

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Aplicación LEAN MANUFACTURING a una célula autónoma de fabricación de piezas de CN

Autor: Coral María García Macías

Tutor: Fernando Más Morate

Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Aplicación LEAN MANUFACTURING a una célula autónoma de fabricación de piezas de CN

Autor:

Coral María García Macías

Tutor:

Fernando Más Morate

Profesor asociado

Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Aplicación LEAN MANUFACTURING a una célula autónoma de fabricación de piezas de CN

Autor: Coral María García Macías

Tutor: Fernando Más Morate

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A ti

Agradecimientos

Con este trabajo pongo punto y seguido a mi formación como ingeniera. Supone el fin a varios años de trabajo y sacrificio en los que han influido muchas personas a las que me gustaría agradecer todo lo que me han aportado.

A los profesores de la Escuela, por la formación que me han brindado, especialmente aquellos que con su trabajo, dedicación, comprensión y amabilidad han aportado tanto a la consecución de mis propósitos.

A Fernando Más Morate, mi profesor y tutor de este trabajo, por el trato recibido. Por guiarme y aceptar mis decisiones. Por su disponibilidad y cordialidad. Porque ha sido un placer trabajar con él.

A mis compañeros, por la ayuda ofrecida durante todos estos años. Por las alegrías y tristezas compartidas. En especial, a Enrique Ariza Galván y a Manuel José Girona Fajardo, por su trabajo, su ayuda, su paciencia y solidaridad; por su apoyo, sus consejos y ánimos. Por su amistad.

A mi familia en general y a mis padres en concreto, por su apoyo incondicional, por suavizar los problemas cuando yo no les veía solución, por su ayuda emocional.

A ti, Manuel Jesús Ibáñez Tirado, por ser el pilar más importante en mi vida durante este tiempo, por tu saber estar, por tu cariño y comprensión, por animarme a cumplir todos mis objetivos.

A todos, GRACIAS.

Resumen

Este trabajo muestra una aplicación de las técnicas Lean Manufacturing a una célula autónoma de fabricación de piezas de control numérico. Mediante el establecimiento del sistema productivo de la célula y la búsqueda de los desperdicios que se generan en la fabricación de una familia de piezas, se pretende encontrar una solución que minimice los despilfarros y reduzca el tiempo de producción.

| | |
|---|---------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xviiiv |
| Índice de Figuras | xxi |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1. <i>Motivación del trabajo</i> | 1 |
| 1.2. <i>Objetivos</i> | 2 |
| 1.3. <i>Estructura y contenido del documento</i> | 3 |
| 2 Fabricación Celular | 5 |
| 2.1. <i>Contexto</i> | 5 |
| 2.2. <i>Antecedentes. Tecnología de grupos</i> | 9 |
| 2.3. <i>Características de la fabricación celular</i> | 12 |
| 2.3.1. La célula de fabricación | 13 |
| 2.3.1.1. Concepto de pieza compuesta | 13 |
| 2.3.1.2. Diseño de una célula | 14 |
| 2.3.1.3. Tipos de células y layout | 15 |
| 2.3.2. Procedimientos de formación de células | 17 |
| 2.3.2.1. Técnicas manuales | 18 |
| 2.3.2.2. Sistemas de clasificación y codificación | 18 |
| 2.3.2.3. Análisis estadístico de agrupación | 18 |
| 2.3.2.4. Clasificación por matriz máquina-pieza | 19 |
| 2.3.2.5. Técnicas matemáticas | 21 |
| 2.3.2.6. Inteligencia artificial | 21 |
| 2.3.3. Beneficios de la fabricación celular | 22 |
| 2.4. <i>Automatización de la producción</i> | 23 |
| 2.4.1. Tipos de automatización | 23 |
| 2.4.2. Control Numérico | 24 |
| 2.4.3. Introducción a la programación de piezas de CN | 26 |
| 2.5. <i>Fabricación flexible</i> | 29 |
| 2.5.1. Sistemas de fabricación flexible | 29 |
| 2.5.2. Células de fabricación flexible | 33 |
| 2.5.3. Concepto de flexibilidad | 34 |
| 2.5.4. Beneficios de la fabricación flexible | 35 |
| 3 Lean Manufacturing | 37 |
| 3.1. <i>Origen y antecedentes. Toyota Production System</i> | 37 |
| 3.2. <i>Estructura del sistema Lean Manufacturing</i> | 38 |
| 3.2.1. El techo: el valor como objetivo | 40 |
| 3.2.2. Los pilares: JIT y Jidoka | 40 |
| 3.2.3. Los cimientos: herramientas y metodologías Lean | 41 |
| 3.2.3.1. Heijunka | 42 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.3.1. Organización por procesos | 42 |
| 3.2.3.3. Estandarización | 42 |
| 3.2.3.4. TPM | 43 |
| 3.2.3.5. SMED | 45 |
| 3.2.3.6. Las 5 S | 46 |
| 3.2.3.7. Kanban | 47 |
| 3.2.3.8. Gestión visual | 48 |
| 3.2.3.8.1. Paneles SQCDP | 49 |
| 3.2.3.9. KPI | 50 |
| 3.2.3.10. VSM | 51 |
| 3.2.3.11. Kaizen. La mejora continua | 53 |
| 3.2.3.11.1. Diagrama causa-efecto de Ishikawa | 54 |
| 3.2.3.11.2. Principio de Pareto | 54 |
| 3.2.3.11.3. Seis Sigma | 56 |
| 3.2. <i>El círculo Deming: PDCA</i> | 57 |
| 3.3. <i>El despilfarro o Muda, Mura y Muri</i> | 58 |
| 3.4. <i>Principios Lean</i> | 61 |
| 4 Situación inicial de la célula autónoma de fabricación | 63 |
| 4.1. <i>Punto de partida</i> | 63 |
| 4.2. <i>Decisiones: situación inicial</i> | 65 |
| 4.2.1. La célula "flexible lean" | 65 |
| 4.2.2. Piezas a fabricar | 65 |
| 4.2.3. Maquinaria | 68 |
| 4.2.4. Almacenes | 71 |
| 4.2.5. Layout | 74 |
| 4.2.6. Operarios | 83 |
| 4.2.7. Producción y tiempos de fabricación | 85 |
| 4.2.7.1. Incidentes y tiempos asociados | 97 |
| 4.3. <i>Desperdicios: necesidad de cambio</i> | 104 |
| 5 Aplicación de las técnicas de Lean Manufacturing | 107 |
| 5.1. <i>Alternativas para la reducción de desperdicios</i> | 107 |
| 5.1.1. Alternativa 1: duplicación de maquinaria | 107 |
| 5.1.1.1. Tiempos de fabricación | 109 |
| 5.1.1.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios | 114 |
| 5.1.1.3. Incidentes y tiempos asociados | 117 |
| 5.1.2. Alternativa 2: layout centrado en robots | 123 |
| 5.1.2.1. Tiempos de fabricación | 124 |
| 5.1.2.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios | 129 |
| 5.1.2.3. Incidentes y tiempos asociados | 132 |
| 5.1.3. Alternativa 3: cambio de distribución de la planta de fabricación | 138 |
| 5.1.3.1. Producción: tiempos y proceso de fabricación | 141 |
| 5.1.3.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios | 143 |
| 5.2. <i>Comparación de las alternativas con la situación inicial</i> | 146 |
| 5.3. <i>Solución: alternativa elegida</i> | 148 |
| 5.4. <i>Aplicación de las técnicas Lean</i> | 154 |
| 5.4.1. Herramientas Lean empleadas en la célula | 154 |
| 5.4.2. Implantación de nuevas herramientas Lean | 155 |
| 5.4.3. Cambios a largo plazo | 162 |
| 6 Análisis de resultados y conclusiones | 165 |
| 6.1. <i>Resumen de la solución y los beneficios encontrados</i> | 165 |
| 6.2. <i>Equilibrado de la línea</i> | 168 |
| 6.3. <i>Conclusiones</i> | 171 |

| | |
|---|------------|
| Anexos | 175 |
| <i>Anexo A: Tiempos de sobreprocesamiento</i> | 175 |
| A.1. Situación inicial | 175 |
| A.2. Alternativa 1 | 180 |
| A.3. Alternativa 2 | 186 |
| <i>Anexo B: Equilibrado de la línea de producción</i> | 191 |
| Glosario | 199 |
| Bibliografía | 201 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2–1. Tipos de producción actuales. Fuente: Elaboración propia | 8 |
| Tabla 2–2. Atributos de diseño y manufactura que se incluyen típicamente en un sistema de clasificación y codificación de piezas. Fuente [2] | 10 |
| Tabla 2–3. Estructura básica del sistema de clasificación y codificación de Opitz. Fuente [2] | 11 |
| Tabla 2–4. Relación de piezas y las máquinas asociadas a sus procesos de fabricación. Fuente: Elaboración propia. | 12 |
| Tabla 2–5. Familias de piezas agrupadas por máquinas comunes. Fuente: Elaboración propia. | 12 |
| Tabla 2–6. Características de diseño y operaciones de manufactura de la pieza compuesta de la figura 2.6. Fuente [2] | 13 |
| Tabla 2–7. Máquinas a analizar. Fuente [3] | 19 |
| Tabla 2–8. Pasos 1 y 2 del método ROC. Fuente: Elaboración propia | 20 |
| Tabla 2–9. Pasos 3 y 4 del método ROC. Fuente: Elaboración propia | 20 |
| Tabla 2–10. Pasos 5 y 6 del método ROC. Fuente: Elaboración propia | 20 |
| Tabla 2–11. Programación manual para realizar taladros mediante código ISO de la figura 2.18. Fuente [4] | 27 |
| Tabla 2–12. Programación automática para realizar taladros mediante código ISO de la figura 2.18. Fuente [4] | 28 |
| Tabla 3–1. Puntuaciones de criterios AMFEC. Fuente: Elaboración propia | 55 |
| Tabla 3–2. IPR calculado para cada causa respecto del total y % acumulado de cada una. Fuente: Elaboración propia | 55 |
| Tabla 4–1. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 88 |
| Tabla 4–2. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B. Fuente: Elaboración propia | 88 |
| Tabla 4–3. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina. Fuente: Elaboración propia | 90 |
| Tabla 4–4. Tiempo (en segundos) no productivo y esperas durante la fabricación de cada pieza. Fuente: Elaboración propia | 91 |
| Tabla 4–5. Comparativa del tiempo que cada pieza permanece en la célula durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia | 92 |
| Tabla 4–6. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores. Fuente: Elaboración propia | 93 |
| Tabla 4–7. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 4.32. Fuente: Elaboración propia | 96 |
| Tabla 4–8. Resumen de tiempos de sobreproducción y horas de comienzo y final de las secuencias de piezas. Fuente: Elaboración propia | 99 |
| Tabla 4–9. Tiempos de trabajo de los operarios durante la fabricación de las nuevas piezas. Fuente: Elaboración propia | 100 |
| Tabla 4–10. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento. Fuente: Elaboración propia | 101 |
| Tabla 4–11. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 4.38. Fuente: Elaboración propia | 104 |
| Tabla 5–1. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A en la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 110 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5–2. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B en la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 110 |
| Tabla 5–3. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 111 |
| Tabla 5–4. Tiempos (en segundos) no productivos y esperas durante la fabricación con duplicación de maquinaria. Fuente: Elaboración propia | 112 |
| Tabla 5–5. Comparativa del tiempo que cada pieza permanece en la célula con duplicación de maquinaria durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia | 113 |
| Tabla 5–6. Desglose del tiempo de producción por turno con duplicación de maquinaria. Fuente: Elaboración propia | 113 |
| Tabla 5–7. Duración de las tareas y asignación de las mismas a los trabajadores para el sistema de fabricación propuesto como alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 114 |
| Tabla 5–8. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.7. Fuente: Elaboración propia | 116 |
| Tabla 5–9. Resumen de tiempos de sobreproducción y horas de comienzo y final de la fabricación de las distintas secuencias de piezas en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 118 |
| Tabla 5–10. Tiempos de trabajo de los operarios durante la fabricación de las nuevas piezas en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 119 |
| Tabla 5–11. Duración de las tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 119 |
| Tabla 5–12. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.12. Fuente: Elaboración propia | 122 |
| Tabla 5–13. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A en la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 126 |
| Tabla 5–14. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B en la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 126 |
| Tabla 5–15. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 127 |
| Tabla 5–16. Tiempos (en segundos) no productivos y esperas durante la fabricación en la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 128 |
| Tabla 5–17. Comparativa del tiempo que cada pieza permanece en la célula de la alternativa 2 durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia | 128 |
| Tabla 5–18. Desglose del tiempo de producción por turno en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 129 |
| Tabla 5–19. Duración de las tareas y asignación de las mismas a los trabajadores para el sistema de fabricación propuesto como alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 129 |
| Tabla 5–20. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.19. Fuente: Elaboración propia | 131 |
| Tabla 5–21. Resumen de tiempos de sobreproducción y horas de comienzo y final de la fabricación de las distintas secuencias de piezas en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 134 |
| Tabla 5–22. Tiempos de trabajo del operario 3 durante la fabricación de las nuevas piezas en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 134 |
| Tabla 5–23. Duración de las tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 135 |
| Tabla 5–24. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.12. Fuente: Elaboración propia | 137 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5–25. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.27. Fuente: Elaboración propia | 140 |
| Tabla 5–26. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.27. Fuente: Elaboración propia | 140 |
| Tabla 5–27. Comparativa de los tiempos de producción ideal para la configuración de planta de la situación inicial y la propuesta como alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 142 |
| Tabla 5–28. Comparativa de los tiempos de producción con sobreprocesamiento para la configuración de planta de la situación inicial y la propuesta como alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 143 |
| Tabla 5–29. Comparativa de las características de la célula en cada situación. Fuente: Elaboración propia | 147 |
| Tabla 5–30. Duración de las tareas y operarios a cada una de ellas en las situaciones de fabricación ideal y fabricación con piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 149 |
| Tabla 5–31. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.37. Fuente: Elaboración propia | 150 |
| Tabla 5–32. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.37. Fuente: Elaboración propia | 150 |
| Tabla 5–33. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Seguridad del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia | 158 |
| Tabla 5–34. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Calidad del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia | 159 |
| Tabla 5–35. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Costes del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia | 159 |
| Tabla 5–36. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Entregas del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia | 160 |
| Tabla 5–37. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Personas del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia | 160 |
| Tabla 5–38. Ejemplos de KPI para cada indicador del panel SQCDP sobre la producción de la célula durante el mes de mayo. Fuente: Elaboración propia | 161 |
| Tabla 6–1. Comparativa de las características relevantes de la célula en las situaciones inicial y final. Fuente: Elaboración propia | 167 |
| Tabla 6–2. Listado de tareas y tiempo de ejecución de cada una de ellas. Fuente: Elaboración propia | 169 |
| Tabla 6–3. Tareas asociadas a cada estación de trabajo. Fuente: Elaboración propia | 170 |
| Tabla A–1. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA. Fuente: Elaboración propia | 176 |
| Tabla A–2. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AAAA. Fuente: Elaboración propia | 176 |
| Tabla A–3. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB. Fuente: Elaboración propia | 177 |
| Tabla A–4. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB. Fuente: Elaboración propia | 177 |
| Tabla A–5. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AB o ABB. Fuente: Elaboración propia | 178 |
| Tabla A–6. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA. Fuente: Elaboración propia | 178 |

| | |
|--|-----|
| Tabla A–7. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAB. Fuente: Elaboración propia | 179 |
| Tabla A–8. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA. Fuente: Elaboración propia | 179 |
| Tabla A–9. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB. Fuente: Elaboración propia | 180 |
| Tabla A–10. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 181 |
| Tabla A–11. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AAAA en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 181 |
| Tabla A–12. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 182 |
| Tabla A–13. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 182 |
| Tabla A–14. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AB o ABB en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 183 |
| Tabla A–15. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA en la célula de la alternativa 1 Fuente: Elaboración propia | 184 |
| Tabla A–16. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAB en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 184 |
| Tabla A–17. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 185 |
| Tabla A–18. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 185 |
| Tabla A–19. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 186 |
| Tabla A–20. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AAAA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 187 |
| Tabla A–21. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 187 |
| Tabla A–22. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 187 |
| Tabla A–23. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AB o ABB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 188 |
| Tabla A–24. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA en la célula de la alternativa 2 Fuente: Elaboración propia | 189 |
| Tabla A–25. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 189 |
| Tabla A–26. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 190 |
| Tabla A–27. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 190 |
| Tabla B-1. Listado de tareas, tiempo de ejecución y peso asociado según el algoritmo de Helgeson y Birnie. Fuente: Elaboración propia | 192 |
| Tabla B-2. Listado de tareas ordenadas por el peso. Fuente: Elaboración propia | 194 |
| Tabla B-3. Equilibrado de las tareas. Fuente: Elaboración propia | 196 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2–1. Esquema de distribución en planta por Posición Fija. Fuente [1] | 6 |
| Figura 2–2. Esquema de flujos de operaciones en varios talleres. Fuente [1] | 6 |
| Figura 2–3. Tipos de distribuciones en planta por producto. Fuente [1] | 7 |
| Figura 2–4. Esquema de distribución en planta mediante células. Fuente [1] | 7 |
| Figura 2–5. Ejemplos de familias de piezas. Fuente [2] | 9 |
| Figura 2–6. Ejemplo de monocódigo. Fuente [6] | 10 |
| Figura 2–7. Ejemplo de policódigo. Fuente [6] | 11 |
| Figura 2–8. A la izda., pieza compuesta de una familia de piezas rotatorias. A la dcha., las características individuales de la pieza compuesta. Fuente [2] | 13 |
| Figura 2–9. Pasos en el diseño de una célula. Fuente: Elaboración propia | 14 |
| Figura 2–10. Célula de máquina única. Fuente [2] | 15 |
| Figura 2–11. Célula en forma de U. Fuente [2] | 15 |
| Figura 2–12. Célula de múltiples máquinas y manipulación de material automática en forma de línea recta (a), de bucle (b) y rectangular (c). Fuente [2] | 16 |
| Figura 2–13. Clasificación de los procedimientos de formación de células. Fuente: Elaboración propia | 17 |
| Figura 2–14. Ejemplo de Redes Neuronales. Fuente: Elaboración Propia | 22 |
| Figura 2–15. Tipos de automatización según variedad y cantidad de productos fabricados. Fuente: Elaboración propia | 24 |
| Figura 2–16. Estructura del CN. Fuente: Elaboración propia | 24 |
| Figura 2–17. Ejes de una máquina CN. Fuente: www.virtual.unal.edu.co | 25 |
| Figura 2–18. Ejemplo de pieza a mecanizar mediante CN. Fuente [4] | 27 |
| Figura 2–19. Ejemplos de FMS: a) en línea, b) en bucle, c) en escalera, d) a campo abierto, d) centrado en robots. Fuente [2] | 33 |
| Figura 2–20. Ejemplo de célula flexible de fabricación. Fuente [5] | 34 |
| Figura 3–1. Cadena de montaje del automóvil Ford T. Fuente: www.blogs.laverdad.es | 37 |
| Figura 3–2. Telar con detección automática de Sakichi Toyoda. Fuente: www.toyotaprensa.es | 38 |
| Figura 3–3. Taiicho Ohno. Fuente: www.lean.org | 38 |
| Figura 3–4. Templo Lean. Fuente: Elaboración propia | 39 |
| Figura 3–5. Sistema Poka-Yoke. Fuente: www.pdcahome.com | 40 |
| Figura 3–6. Sistema Andon multicolor. Fuente: www.ab.rockwellautomation.com | 41 |
| Figura 3–7. Alerta de incidencias mediante Andon. Fuente: www.andon2013.blospot.com.es | 41 |
| Figura 3–8. Pilares TPM. Fuente: Elaboración propia | 43 |
| Figura 3–9. Las 5 S. Fuente: Elaboración propia | 46 |
| Figura 3–10. Ejemplos de kanban de a) producción y b) fabricación. Fuente: Elaboración propia | 48 |
| Figura 3–11. De izquierda a derecha: marcas de territorio, tablero e indicadores visuales. Fuente: www.adypi.com | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 3–12. Panel informativo SQCDP. Fuente [11] | 50 |
| Figura 3–13. Simbología estándar VSM. Fuente: Elaboración propia | 53 |
| Figura 3–14. Ejemplo de mapeo de flujo de la cadena de valor. Fuente: www.human.es | 53 |
| Figura 3–15. Diagrama causa-efecto de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia. | 54 |
| Figura 3–16. Ejemplo de Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia | 55 |
| Figura 3–17. Ciclo PDCA. Fuente: Elaboración propia | 57 |
| Figura 3–18. Los 8 desperdicios. Fuente: Elaboración propia | 60 |
| Figura 3–19. Principios Lean. Fuente: Elaboración propia | 61 |
| Figura 3–20. Sistemas Push y Pull. Fuente: Elaboración propia | 62 |
| Figura 4–1. Ilustración del punto de partida de la planta de fabricación, incluyendo las capacidades de máquinas y almacenes. Fuente: Elaboración propia | 64 |
| Figura 4–2. Diseño mediante CATIA de las piezas a fabricar: a) pieza de tipo A, b) pieza de tipo B. Fuente: Elaboración propia | 66 |
| Figura 4–3. Uniones de las piezas: a) distintas vistas de la unión de los dos tipos de piezas, b) localización de los dos pares de uniones en la sección de fuselaje, c) zoom de la unión con las cuadernas y otras piezas pequeñas. Fuente: Elaboración propia | 66 |
| Figura 4–4. Secuencia de operaciones de fabricación de pieza de tipo A: a) operaciones de fresado, b) achaflanados. Fuente: Elaboración propia | 67 |
| Figura 4–5. Secuencia de operaciones de fabricación de piezas de tipo B: a) operacione d fresado, b) achaflanados. Fuente: Elaboración propia | 68 |
| Figura 4–6. a) Ejemplo de fresadora vertical carenada de control numérico y b) fresado con refrigeración. Fuente: www.int.haascnc.com | 69 |
| Figura 4–7. Ejemplo de rectificadora de control numérico. Fuente: www.interempresas.net | 70 |
| Figura 4–8. Ejemplo de máquina de medición de coordenadas de control numérico. Fuente: www.Industic.es | 70 |
| Figura 4–9. Ejemplo de máquina de limpieza manual. Fuente: www.directindustry.es | 70 |
| Figura 4–10. Sistema de cajones telescópicos para el almacenamiento de tochos. Fuente: Elaboración propia | 71 |
| Figura 4–11. Sistema de cajones telescópicos para el almacenamiento de útiles. Fuente: Elaboración propia | 72 |
| Figura 4–12. Estantería de bandejas correderas para el almacenamiento de piezas terminadas. Fuente: Elaboración propia | 72 |
| Figura 4–13. Estantes intermedios. Fuente: Elaboración propia | 73 |
| Figura 4–14. Cuba de desechos para piezas no conformes. Fuente: Elaboración propia | 73 |
| Figura 4–15. Transportes manuales usados en la planta de fabricación: a) carretilla, b) transpaleta. Fuentes: www.logismarket.es y www.magliner.es | 74 |
| Figura 4–16. Diagrama de flujo de la secuencia de operaciones durante la fabricación. Fuente: Elaboración propia | 75 |
| Figura 4–17. Layout general de la planta de fabricación con las medidas principales (en metros). Fuente: Elaboración propia | 76 |
| Figura 4–18. Distribución en planta del área de almacenamiento externo superior. Fuente: Elaboración propia | 77 |
| Figura 4–19. Ejemplo de brazo mecánico o robot con pinza a presión. Fuente: www.ingenieriatecnoindustrial.blospot.com | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4–20. Ejemplo de célula con robots móviles sobre carril. Fuente: Elaboración propia | 79 |
| Figura 4–21. Célula de fabricación en forma de U de la situación inicial. Fuente: Elaboración propia | 79 |
| Figura 4–22. Flujos de material de las piezas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 81 |
| Figura 4–23. Flujos de material de las piezas de tipo B. Fuente: Elaboración propia | 81 |
| Figura 4–24. Flujos de útiles. Fuente: Elaboración propia | 82 |
| Figura 4–25. Flujos de útiles y material de las piezas de ambos tipos. Fuente: Elaboración propia | 82 |
| Figura 4–26. Diagrama de espaguete de todos los movimientos de los trabajadores en la situación inicial. Fuente: Elaboración propia | 84 |
| Figura 4–27. Fases del estudio de tareas y tiempos involucrados en la producción de las piezas. Fuente: Elaboración propia | 85 |
| Figura 4–28. Turno de trabajo del operario 1. Fuente: Elaboración propia | 93 |
| Figura 4–29. Turno de trabajo del operario 2. Fuente: Elaboración propia | 94 |
| Figura 4–30. Turno de trabajo del operario 3. Fuente: Elaboración propia | 95 |
| Figura 4–31. Turno de trabajo del supervisor. Fuente: Elaboración propia | 95 |
| Figura 4–32. Diagrama de espaguete de todos los movimientos de los operarios en la situación ideal de producción. Fuente: Elaboración propia | 96 |
| Figura 4–33. Fases del estudio de tiempos cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 97 |
| Figura 4–34. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 101 |
| Figura 4–35. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 102 |
| Figura 4–36. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 102 |
| Figura 4–37. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia | 103 |
| Figura 4–38. Diagrama de espaguete de todos los movimientos de los operarios cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 104 |
| Figura 5–1. Nuevo layout de la célula como primera alternativa a la situación inicial. Fuente: Elaboración propia | 108 |
| Figura 5–2. Situación de la célula con duplicación de maquinaria en la planta de fabricación. Fuente: elaboración propia | 108 |
| Figura 5–3. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 114 |
| Figura 5–4. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 115 |
| Figura 5–5. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 115 |
| Figura 5–6. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 116 |
| Figura 5–7. Diagrama de espaguete de los movimientos de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 117 |
| Figura 5–8. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 120 |
| Figura 5–9. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 121 |
| Figura 5–10. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5–11. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia | 121 |
| Figura 5–12. Diagrama de espagueti de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 1, cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 122 |
| Figura 5–13. Nuevo layout de la célula como segunda alternativa a la situación inicial. Fuente: Elaboración propia | 123 |
| Figura 5–14. Situación de la célula centrada en robots en la planta de fabricación. Fuente: elaboración propia | 124 |
| Figura 5–15. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 130 |
| Figura 5–16. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 130 |
| Figura 5–17. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 131 |
| Figura 5–18. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 131 |
| Figura 5–19. Diagrama de espagueti de los movimientos de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 132 |
| Figura 5–20. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 135 |
| Figura 5–21. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 136 |
| Figura 5–22. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 136 |
| Figura 5–23. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia | 136 |
| Figura 5–24. Diagrama de espagueti de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 2, cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 137 |
| Figura 5–25. Layout y desplazamientos de los operarios dentro de la planta de fabricación durante un turno. Fuente: Elaboración propia | 138 |
| Figura 5–26. Nuevo layout de la planta de fabricación célula propuesta en la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 139 |
| Figura 5–27. Diagrama de espagueti de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 141 |
| Figura 5–28. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 143 |
| Figura 5–29. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 144 |
| Figura 5–30. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 144 |
| Figura 5–31. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 144 |
| Figura 5–32. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 145 |
| Figura 5–33. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 145 |
| Figura 5–34. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 145 |
| Figura 5–35. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia | 146 |
| Figura 5–36. Layout final de la planta de fabricación. Fuente: Elaboración propia | 148 |
| Figura 5–37. Diagrama de espagueti de los desplazamientos de los operarios en la situación final. Fuente: Elaboración propia | 150 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5–38. Diagrama de espagueti de los desplazamientos de los operarios en la situación final cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 151 |
| Figura 5–39. Turnos de trabajo de los operarios y del supervisor en la situación final. Fuente: Elaboración propia | 152 |
| Figura 5–40. Turnos de trabajo de los operarios y del supervisor en la situación final cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia | 153 |
| Figura 5–41. Panel informativo SQCDP. Fuente [11] | 156 |
| Figura 6–1. Layout general de la planta de fabricación con sus principales medidas (en metros) a) en la situación inicial y b) en la situación final. Fuente: Elaboración propia | 167 |
| Figura 6–2. Duración de las tareas antes del equilibrado. Fuente: Elaboración propia | 169 |
| Figura 6–3. Diagrama de secuencia de las tareas y su agrupación por estaciones de trabajo. Fuente: Elaboración propia | 170 |
| Figura 6–4. Solución del equilibrado de la producción de la célula en la situación final. Fuente: Elaboración propia | 170 |
| Figura B–1. Diagrama de secuencia de las tareas registradas en la tabla B.1. Fuente: Elaboración propia | 193 |
| Figura B–2. Duración de las tareas antes del equilibrado. Fuente: Elaboración propia | 193 |
| Figura B–3. Diagrama de secuencia de las tareas y su agrupación por estaciones de trabajo. Fuente: Elaboración propia | 196 |
| Figura B–4. Solución del equilibrado de la producción de la célula en la situación final. Fuente: Elaboración propia | 197 |

1 INTRODUCCIÓN

Para una organización, la mejora continua de su desempeño global debe ser un objetivo permanente.

- William Edwards Deming -

1.1. Motivación del trabajo

A lo largo de la historia las personas han sentido la necesidad de mejorar continuamente hacia un mejor estado de bienestar, bien en sus métodos de trabajo o bien en sus actividades cotidianas. Desde los antiguos egipcios hasta nuestros días el ser humano ha desarrollado métodos que facilitan, mejoran u optimizan todo tipo de actividades, desde el lavado de la ropa hasta la fabricación de automóviles.

El sentimiento de mejora y, más allá, el de mejora continua es una manifestación del progreso empresarial de cualquier organización, especialmente de carácter industrial. Actualmente, la metodología de trabajo Lean Manufacturing constituye el entorno de trabajo estándar en la industria aeroespacial. Su filosofía de trabajo y la aplicación de sus métodos y técnicas de fabricación están orientados a la mejora continua de los procesos productivos a través de la reducción de todo tipo de desperdicios, definidos éstos como cualquier actividad o proceso que usa más recursos de los necesarios. El objetivo es generar una nueva cultura dentro de la organización, en la que todos los miembros de la misma sientan la necesidad y sean capaces de encontrar y aplicar los mejores métodos de fabricación.

La producción mediante células de trabajo es una de las técnicas de fabricación Lean más usadas para la reducción de desperdicios y para producir en cada momento sólo lo que es necesario. Tradicionalmente las empresas enfocaban sus sistemas productivos bien a los procesos, cuya manifestación más importante es la producción por lotes, o bien al producto, en la que se encuentran la producción en línea y la producción en serie. Mediante la fabricación celular se consigue aunar las ventajas de los antiguos enfoques, dotando al sistema productivo de flexibilidad en sus procesos y variedad en sus productos. La configuración de la célula y su emplazamiento en la planta de fabricación dependen de numerosos factores como la cantidad y variedad de productos a fabricar o la ubicación de las demás instalaciones de la planta. Todos los factores son importantes a tener en cuenta para la elección de la disposición más eficiente de los equipos de trabajo de la célula.

Por otra parte con el avance de la tecnología, la automatización, la programación de las operaciones de fabricación mediante control numérico y el empleo de robots o brazos articulados robotizados dotan a las células de autonomía y flexibilidad para llevar a cabo la fabricación de todo tipo de productos, creando un nuevo concepto de sistema productivo: la fabricación flexible.

En la industria aeronáutica es de uso común tanto el empleo de células de trabajo autónomas y flexibles como la aplicación de las técnicas Lean para la fabricación de partes del avión. La percepción de la generación de despilfarros y la iniciativa de mejora continua hacia un sistema excelente de producción son esenciales para la buena práctica de la metodología Lean, permitiendo así el crecimiento de la empresa en un mercado cada vez más exigente y competitivo.

1.2. Objetivos

Debido al constante auge de los métodos de fabricación Lean en la industria y a su extendido uso en la fabricación de aviones o partes de ellos, este Trabajo Fin de Grado pretende mostrar una aplicación de esta filosofía a una célula autónoma de fabricación de piezas de control numérico. Sus principales objetivos se detallan a continuación.

- La determinación de las principales características de la célula de trabajo: producto a fabricar, proceso de fabricación de dicho producto, descripción de cada tarea o actividad necesaria para la fabricación, disposición de los elementos y equipos de trabajo que constituyen la célula y layout general de la planta de fabricación. Asimismo se establecen los principales aspectos del sistema productivo: volumen de producción diario, tiempo de fabricación estimado de dicho volumen, número de trabajadores presentes durante la fabricación y descripción general de los turnos de trabajo para hacer frente a la producción.
- Estudio de la generación de desperdicios y posibles inconvenientes durante la fabricación del producto.
- Estudio de varias propuestas de mejora mediante la aplicación de las técnicas Lean Manufacturing para la reducción de desperdicios y elección de la más idónea.

1.3. Estructura y contenido del documento

El documento se compone de seis capítulos estructurados en varias secciones cada uno. Cada sección se divide en subsecciones y éstas, a su vez, en apartados. Por último, algunos apartados se dividen también en sub-apartados. A modo de ejemplo se presenta a continuación la jerarquía de la información dentro de un capítulo.

1. Título del capítulo
 - 1.1. Sección
 - 1.1.1. Subsección
 - 1.1.1.1. Apartado
 - 1.1.1.1.1. Sub-apartado

Cada capítulo se elabora con un fin concreto, bien para introducir al lector en la materia necesaria para el entendimiento satisfactorio de su contenido, bien para describir el problema o bien para buscar la solución a dicho problema y exponer los resultados encontrados. A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

- **Capítulo 1: Introducción**

En el presente capítulo se han expuesto la motivación del trabajo y la necesidad de encontrar una solución al problema propuesto, detallando los objetivos a lograr. Asimismo se describe cómo se ha estructurado el documento para facilitar al lector el seguimiento de éste cuando se citen las distintas secciones y apartados durante la explicación.

Tanto el capítulo 2 como el capítulo 3 han sido concebidos para mostrar al lector el *estado del arte* del tipo de sistema productivo más común y de la metodología de trabajo más exitosa, respectivamente, que se emplean actualmente en la industria aeronáutica.

- **Capítulo 2: Fabricación Celular**

El capítulo 2 describe las características y conceptos generales del sistema de fabricación empleado en la célula objeto de estudio de este trabajo, la fabricación celular, así como los principales métodos de formación de células. Del mismo modo se proporcionan nociones básicas sobre el control numérico y la automatización de las máquinas que conforman la célula. Por último, se introducen los sistemas de fabricación flexible como consecuencia del empleo de la automatización generalizada en los puestos de trabajo.

- **Capítulo 3: Lean Manufacturing**

En el capítulo 3 se detallan los principios, las técnicas y las herramientas de la metodología de trabajo Lean Manufacturing y los principales beneficios que aporta en la empresa tras su implantación.

- **Capítulo 4: Situación inicial de la célula autónoma de fabricación**

En el capítulo 4 se describe el punto de partida en el cual se inicia el estudio y se establecen la situación y el sistema productivo iniciales de la célula, a partir de los cuales se pueden plantear distintas propuestas de mejora.

- **Capítulo 5: Aplicación de las técnicas Lean**

En el capítulo 5 se muestran distintas alternativas que, desde la filosofía Lean, pretenden solucionar los problemas o inconvenientes que se producen durante la fabricación del producto en la configuración de la célula descrita en la situación inicial. Tras comparar dichas alternativas se elige la solución más idónea, para la cual se describe la implantación de otras técnicas Lean que no se hayan impuesto antes.

- **Capítulo 6: Análisis de resultados y conclusiones**

En el capítulo 6 se expone un breve resumen del proceso de obtención de la solución y su comparación con la situación inicial de fabricación y se realiza el equilibrado de la línea como solución al problema. Finalmente se sintetizan los resultados más relevantes del estudio y se muestran las conclusiones finales del trabajo.

2 FABRICACIÓN CELULAR

“Los logros de una organización son los resultados del esfuerzo combinado de cada individuo”.

-Vince Lombardi-

La fabricación celular es un sistema productivo en el que los equipos y las estaciones de trabajo se instalan y organizan en una secuencia que apoya un flujo regular de materiales y componentes con un mínimo de transportes y retrasos. Extrae su nombre de la palabra célula. Una célula de fabricación es un conjunto de personas y máquinas o estaciones de trabajo que realizan todos los pasos de un proceso o algunos de ellos, en el que las máquinas se ordenan atendiendo a la secuencia de dicho proceso.

2.1. Contexto

Tradicionalmente existen dos formas de enfocar los sistemas de producción industriales: una, orientada a los procesos y otra, al producto. Orientadas a los procesos se encuentran la *producción funcional* y la *producción por lotes*, mientras que la *producción en línea* y la *producción en serie* se orientan al producto. Las principales diferencias entre unas y otras se deben al volumen y a la variedad de productos que se quiera obtener con cada una de ellas y al tipo de distribución en planta o layout.

En la *producción funcional a medida*, también conocida como *Job Shop*, se obtienen lotes pequeños de productos especializados, en los que se busca la flexibilidad en el diseño y la innovación, por lo que posiblemente no vuelvan a producirse más. Se caracteriza por una amplia variedad de productos de poca o ninguna estandarización. Los productos suelen ser complejos, y la maquinaria y herramientas, poco especializadas pero muy variadas, se suelen agrupar en talleres o centros de trabajo atendiendo a la función que desarrollan; es decir, es una producción orientada al proceso. Los equipos son versátiles y de uso general, capaces de realizar una gran variedad de operaciones para la alta variedad de productos.

El personal de trabajo de los talleres son personas altamente cualificadas que desarrollan pocos productos muy variados. Suele haber más personal que máquinas, por lo que algunas pueden quedar inactivas si no se precisan. Las personas, por el contrario, están permanentemente ocupadas, por lo que debe haber siempre stock¹ disponible y trabajo en curso. Esto conlleva la aparición de *cuellos de botella*² en algunos puestos de trabajo cuya carga es mayor que en los demás y en los que se acumulan muchos materiales o piezas para ser procesados.

Los plazos de entrega son grandes debido a la personalización de los productos y la disposición en planta más adecuada es la *distribución por posición fija*, en la que los operarios, maquinaria, herramientas y materiales se desplazan hacia el producto debido a que su peso, tamaño, forma o volumen lo hacen imposible de trasladar de un sitio a otro.

¹ Inventario, existencias.

² Fase de la cadena de producción más lenta que las demás que ralentiza el proceso de producción global.

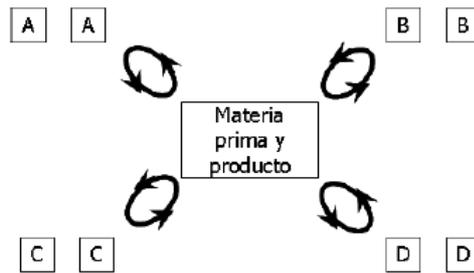


Figura 2. 1. Esquema de distribución en planta por Posición Fija. Fuente [1].

La **producción por lotes** se basa en la obtención de un lote de un cierto producto, para luego cambiar la instalación para producir otro lote de un nuevo tipo de producto. En este caso el proceso de obtención requiere un mayor número de operaciones y más especializadas, con maquinaria más sofisticada. El producto cuenta con varias versiones de entre las cuales el consumidor tendrá que elegir, por lo que presenta más limitaciones en cuanto a variedad que en el caso anterior. Por el contrario el volumen de producción es mayor, contando con lotes más o menos grandes.

Por tanto este tipo de producción puede emplearse para la obtención de productos bajo pedido y su disposición más adecuada es la **distribución por procesos**, en la que los equipos y el personal que realizan las mismas tareas o que desempeñan la misma función se agrupan en la misma zona, llamada **taller**. Este layout es el más adecuado cuando se fabrica una amplia gama de productos que requieren la misma maquinaria y un volumen reducido de cada producto. Se pretende así satisfacer las necesidades de clientes muy diferentes entre sí.

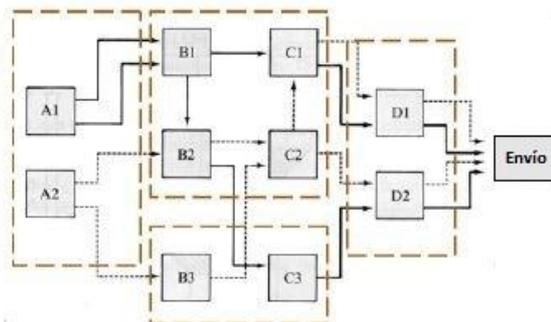


Figura 2. 2. Esquema de flujos de operaciones en varios talleres. Fuente [1].

Los productos se mueven entre las diferentes áreas siguiendo un recorrido más o menos complejo de acuerdo con la secuencia de operaciones que tenga que seguir. De esta forma, cada ítem tiene su propio recorrido dentro de la planta. Debido a la existencia de una amplia variedad de productos distintos, habrá también diversidad de flujos de materiales entre talleres, lo que hace crucial la adopción de distribuciones flexibles y medios para controlar los tiempos de recorrido de una zona a otra para que no intercedan entre sí.

La **producción en línea** se adopta cuando se fabrican lotes grandes de productos poco variados, en los que comparten un diseño común. En la planta, se disponen múltiples estaciones de trabajo una detrás de otra, por las que pasan los productos, cuyo proceso de obtención requiere una secuencia similar de operaciones, aunque alguno de ellos puedan precisar una operación distinta. Los equipos son especializados para cada tipo de operación y cada estación involucra diferentes equipos y trabajadores para la realización de tareas. Cuando se finaliza la fabricación de un producto, se procede a la modificación de la instalación, esto es, preparar las máquinas, herramientas y útiles para producir otro lote distinto y así, sucesivamente.

Se puede hacer una distinción entre control automático o manual del ciclo productivo dentro de la producción en línea. Con el control automatizado de los equipos de producción, se consigue un volumen mayor de productos, con una calidad elevada y a menor coste.

La **producción en serie** se caracteriza por un volumen muy elevado de productos fabricados, de escasa variedad, que se pretende que sean consumidos de forma masiva. El producto va pasando por las diferentes estaciones de trabajo para ser procesado en máquinas acondicionadas para la alta producción y diseñadas para realizar siempre la misma operación. Generalmente, se adopta un control automatizado de la producción. Debido a esto, los operarios se encargan directamente de pocas operaciones en la secuencia de procesos, basándose su trabajo principal en el seguimiento y mantenimiento de las mismas, en el control de calidad, así como en la alimentación y vaciado de las máquinas, siempre que no se realicen de forma automática.

El tipo de layout más apropiado para la producción en línea y en serie es la **distribución por producto**, que se adopta cuando la producción tiene una configuración continua o repetitiva, característico de las cadenas de montaje, planta de procesos químicos o embotellado de refrescos, por ejemplo. La maquinaria y equipos necesarios para fabricar un tipo de producto se agrupan en una misma zona y se ordenan de acuerdo al proceso de fabricación.

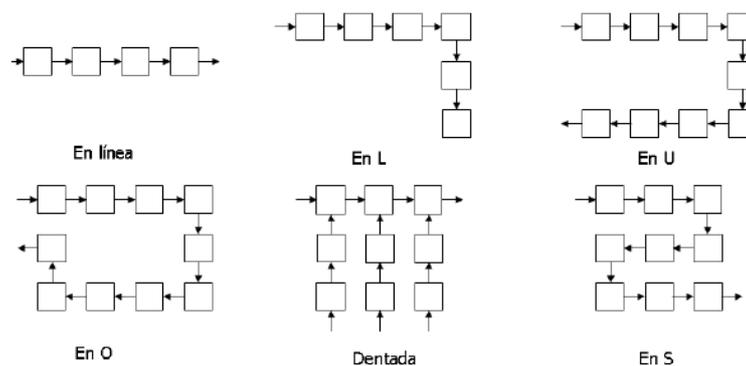


Figura 2. 3. Tipos de distribuciones en planta por producto. Fuente [1].

Este tipo de layout es idóneo cuando se produce una cantidad elevada de productos, pero de variedad reducida y que cuenta con un determinado grado de normalización. Este tipo de configuración viene determinada por la sucesión de operaciones en estaciones de trabajo situadas lo más próximas posible unas de otras.

En este contexto y con motivo de unificar las mejores características de los sistemas productivos orientados al producto y a los procesos, como la eficiencia de los primeros y la variedad de productos de los segundos, surge el concepto de *Tecnología de Grupos* (que se detallará en la sección siguiente) y, derivado de éste, un nuevo sistema de producción llamado **Fabricación, Producción o Manufactura Celular**. Por esta razón la distribución en planta característica de este tipo de producción es la **distribución híbrida, celular o mediante células de fabricación**. En ella los equipos se agrupan en las **células de trabajo** para fabricar diferentes modelos de productos que no requieren un gran cambio de configuración. Cada célula está especializada en un conjunto de piezas que comparten las mismas operaciones y se suele producir una moderada variedad de productos consiguiéndose un volumen de producción elevado.

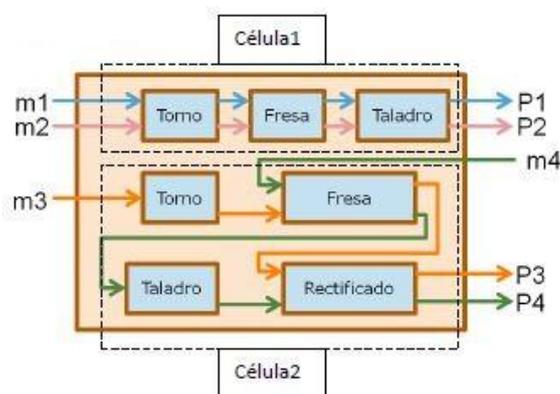


Figura 2.4. Esquema de distribución en planta mediante células. Fuente [1].

Al ser la distribución celular una combinación de las distribuciones por producto y por proceso, la orientación de la producción de tipo celular no queda completamente definida, sino que es una combinación de las dos. Es un tipo de producción que introduce una mayor variedad respecto al layout por procesos y una eficiencia similar a la obtenida con un layout por producto.

Para finalizar, existen otros sistemas productivos más en los que el enfoque de producción está más desarrollado y avanzado, como son la *Producción Lean* y los *Sistemas de Fabricación Flexible*. Con ambas modalidades se busca la reducción de recursos y actividades, así como la producción de lotes pequeños muy variados. La reducción de recursos y actividades se consigue mediante la orientación al producto y flujo lineal de operaciones, consiguiendo una variedad muy elevada y un volumen bajo de productos.

- **La Producción Lean** se basa principalmente en la eliminación de desperdicios, en la eficacia y la eficiencia en los procesos y la entrega a tiempo de pedidos a los clientes. Este tipo de producción se desarrolla en profundidad en el capítulo siguiente.
- **Los Sistemas de Fabricación Flexible (FMS)** son sistemas de producción automatizada, en la que las estaciones de trabajo están conectados mediante sistemas de transporte automáticos y en las que las máquinas y equipamientos están programados informáticamente, para controlarlo todo por ordenador. Con los FMS se optimiza la fabricación por lotes y se consigue una mejora de la producción al optimizar el tiempo de puesta a punto de los materiales en los equipos y por lo tanto, reducir el material en curso. La principal desventaja de este tipo de producción es la elevada inversión inicial en equipos, sistemas de transporte y software, así como la reestructuración completa de la producción.

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla donde se sintetizan las características más importantes de cada tipo de producción.

| | | Producto | | | | |
|-----------------------|---|---------------------------------------|------------------|---------|---------------------------------------|---------------------------|
| | | VARIEDAD | | | | |
| Orientación | | Muy elevada | Bastante elevada | Elevada | Media | Baja o muy baja |
| | | VOLUMEN | | | | |
| | | Muy bajo | Bajo | Medio | Elevado | Muy elevado |
| Orientado al proceso | - | FUNCIONAL A MEDIDA (Job Shop) | POR LOTES | | | |
| | | | | | CELULAR | |
| Orientado al producto | | PRODUCCIÓN LEAN | | | LÍNEA (ciclo controlado por operario) | |
| | | SISTEMA DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS) | | | EN LÍNEA (automatizada) | EN SERIE (flujo continuo) |
| | + | | | | | |

Tabla 2. 1. Tipos de producción actuales. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Antecedentes. Tecnología de Grupos

A finales de la década de 1950, surge la necesidad de aumentar la eficiencia de la producción y de reducir los tiempos de fabricación. Es por ello que expertos e investigadores advierten la posibilidad de agrupar los diferentes productos o piezas fabricados por las semejanzas que presentan en cuanto a diseño y proceso de fabricación. Esta técnica de fabricación, conocida como *Tecnología de Grupos (TG)* fue divulgada y popularizada por Sergei Petrovich Mitrofanov gracias a la publicación de su libro “The Scientific principles of group technology” en 1958.

Sin embargo, la idea de este tipo de fabricación surgió a principios del siglo pasado. En 1925 R. E. Flanders presentó un artículo para la *American Society of Mechanical Engineers* en el que exponía métodos para resolver problemas de fabricación: “estandarización de productos, departamentización por productos y no por procesos, minimización del transporte y control visual del trabajo”. En 1937, A. Sokolovskiy describió las características esenciales de la tecnología de grupos y propuso la estandarización de procesos. En 1938 J.C. Kerr expuso el concepto de “seccionarización” de grupos de máquinas de herramientas para dar a ciertas máquinas trabajos estándar en secuencia con otras máquinas, en un artículo para la *Institution of Production Engineers*. Ya más tarde, en 1960, el investigador H. Opitz desarrolló en Alemania un conocido sistema de clasificación y codificación de piezas. A partir de entonces el término “tecnología de grupos” fue acuñado y empleado por multitud de empresas. También cabe destacar el trabajo de John L. Burbidge publicado en sus 15 libros y sus cerca de 150 artículos.

La tecnología de grupos es, por tanto, un método de manufactura y fabricación en el que se identifican y agrupan piezas de similares características para facilitar el diseño y la producción de piezas semejantes. La idea consiste en clasificar, agrupar y registrar todas las piezas existentes en una base de datos registrando todas sus características de diseño y procesos de fabricación. De esta forma, al producir una pieza nueva se acude a dicha base de datos para buscar un diseño lo más parecido posible que luego se transformará mediante operaciones en el producto deseado. Tras esto, el nuevo diseño se registra y pasa a formar parte de la base de datos.

La clasificación de piezas se lleva a cabo mediante la agrupación de piezas en familias. Una *familia de piezas* es un grupo de piezas que poseen similitudes en la forma, tamaño o en los pasos de procesamiento que se usan en su fabricación. Existen familias, figura 2.5. a), cuyos componentes son geoméricamente diferentes pero sus procesos de obtención son lo bastante similares para poder agrupar las piezas en la misma familia. En otras, los miembros de la familia son iguales a simple vista pero sus procesos de fabricación pueden ser totalmente diferentes, figura 2.5. b).

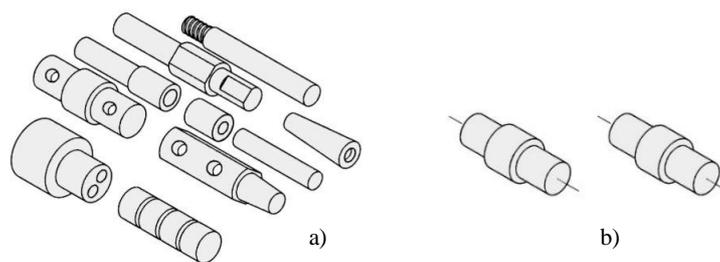


Figura 2. 5. Ejemplos de familias de piezas. Fuente [2].

Para agrupar las piezas en familias es importante tener en cuenta algunos aspectos de la producción, como el tamaño del lote, la frecuencia de producción, el tiempo de fabricación o la producción anual. La formación de familias es uno de los principales problemas al implantar la tecnología de grupos, pero, al mismo tiempo, resulta imprescindible para tener éxito en su implantación. Existen tres técnicas de agrupación o métodos básicos para formar familias de piezas:

1. Inspección visual.
2. Sistema de clasificación y codificación.
3. Análisis de flujo de producción.

La **inspección visual** clasifica las piezas atendiendo a sus características físicas o de diseño a partir de planos y procesos de fabricación. Es un método sencillo, económico y rápido. No obstante, requiere que el número de piezas no sea demasiado grande y que éstas no sean excesivamente complicadas. Además este método depende del criterio y las preferencias personales, por lo que no siempre se asegura que las piezas se clasifican atendiendo al criterio más adecuado para el objetivo que se persigue.

La **clasificación y codificación de piezas** consiste en la identificación de similitudes y diferencias entre las piezas para relacionarlas mediante un esquema de codificación común. Los sistemas de clasificación y codificación de piezas suelen basarse en atributos del diseño de las piezas, en atributos de manufactura o en ambos. Los más típicos se exponen en la tabla 2.2. El sistema de codificación consiste en la transformación de la información de una familia en un patrón o código de números o letras. El código empleado puede ser de tres tipos: monocódigo, policódigo y multicódigo.

| Atributos de diseño de piezas | Atributos de manufactura de piezas | |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Dimensiones principales | Proceso principal | Dimensiones principales |
| Forma básica externa | Secuencia de operación | Forma básica externa |
| Forma básica interna | Tamaño del lote | Relación longitud/diámetro |
| Relación longitud/diámetro | Producción anual | Tipo de material |
| Tipo de material | Máquinas herramienta | Tolerancias |
| Función de la pieza | Herramientas de corte | Acabado superficial |
| Tolerancias | | |
| Acabado superficial | | |

Tabla 2. 2. Atributos de diseño y manufactura que se incluyen típicamente en un sistema de clasificación y codificación de piezas. Fuente [2].

▪ *Monocódigo o código jerárquico*

En este tipo de codificación, conocida también como estructura de árbol, se dividen las partes de la familia en grupos atendiendo, por ejemplo, a las distintas operaciones de fabricación y se le asigna un dígito (del 0 al 9) a cada grupo. Posterior y sucesivamente, cada grupo se divide en subgrupos y se les asignan un nuevo dígito hasta llegar al proceso de obtención final de la pieza deseada. El valor y significado de cada dígito depende del anterior, completando la información del último dígito. De esta forma, cada pieza tendrá una secuencia de números que corresponden a todas las operaciones necesarias para fabricarla. Por ejemplo, una pieza con el código 100 representa una pieza maquinada (1), rotatoria (0) y con una relación longitud/diámetro menor a 1 (0).

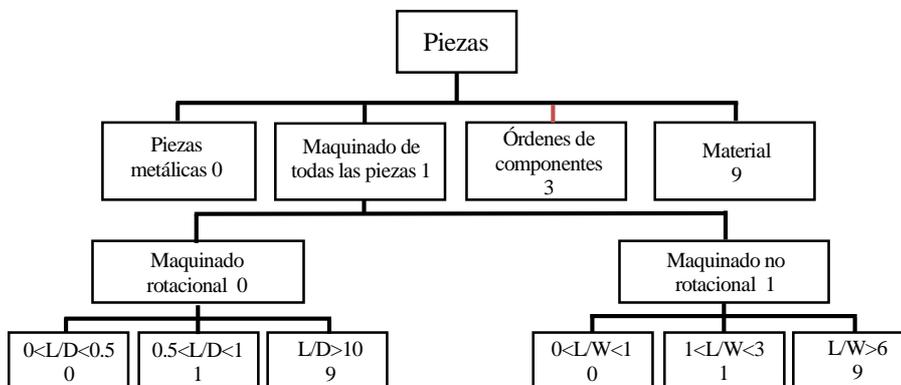


Figura 2. 6. Ejemplo de monocódigo. Fuente [6].

- *Policódigo o código de tipo dígito*

En el policódigo o codificación en cadena, cada dígito tiene un significado único que no depende de los valores de los demás. Por ejemplo, el dígito 1 hace referencia al material, el 2, a la forma, etc. Suelen ser códigos largos, pero cada atributo tiene siempre el mismo dígito asociado, lo que facilita su memorización.

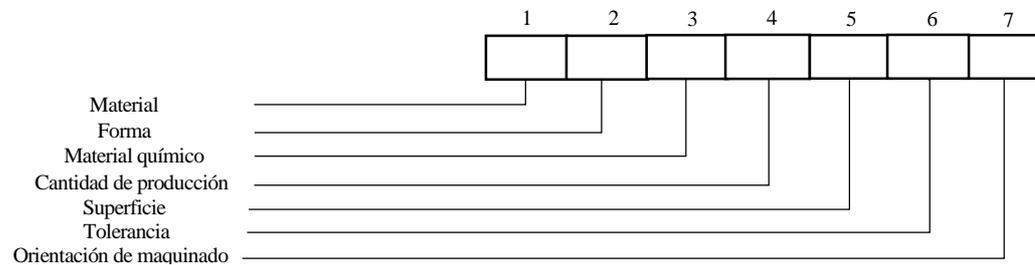


Figura 2. 7. Ejemplo de policódigo. Fuente [6].

- *Multicódigo o código combinado*

El sistema multicódigo es una combinación de los dos anteriores. Se utiliza el monocódigo para la primera clasificación en grupos y el policódigo para los subgrupos siguientes. Existen muchos sistemas de codificación, como el sistema Brisch, el sistema MICLASS o el MULTICLASS, entre otros. Pero, quizás, el sistema de código combinado más conocido sea el *sistema de clasificación y codificación de Opitz*. Consta de nueve dígitos en los que los cinco primeros describen la información esencial del proceso de fabricación y los cuatro restantes añaden información acerca del diseño del producto.

| Dígito | Descripción |
|--------|--|
| 1 | Clase de forma de una pieza: rotatoria contra no rotatoria. Las piezas rotatorias se clasifican mediante la relación longitud-diámetro. Las piezas no rotatorias, por longitud, ancho y grosor. |
| 2 | Características de forma externa: se distinguen diversos tipos. |
| 3 | Maquinado rotatorio. Este dígito se aplica a características de forma interna (p.e. orificios y roscas) en piezas rotatorias y características generales de forma rotatoria para piezas no rotatorias. |
| 4 | Superficies maquinadas planas (p.e. fresados planos y ranuras). |
| 5 | Orificios auxiliares, dientes de engranes y otras características. |
| 6 | Dimensiones, tamaño general |
| 7 | Material de trabajo (p.e. acero, hierro fundido o aluminio). |
| 8 | Forma original de la materia prima. |
| 9 | Requerimientos de exactitud. |

Tabla 2. 3. Estructura básica del sistema de clasificación y codificación de Opitz. Fuente [2].

El **análisis de flujo de la producción** es una técnica para analizar la secuencia de operaciones y la trayectoria de las diferentes piezas a través de las estaciones de trabajo de la planta de producción. Una de sus aplicaciones es la agrupación de piezas de acuerdo al proceso realizado sobre ellas sin importar su geometría. Este análisis emplea una matriz en la que las diferentes piezas constituyen las columnas de dicha matriz y las máquinas de cada proceso, las filas. El modo de expresar que cada máquina realiza operaciones sobre una o varias piezas es colocar un 1 en la casilla correspondiente, tal y como se muestra en la tabla 2.4.

| Piezas | | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| Máquinas | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| M1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 |
| M2 | 1 | | 1 | 1 | | 1 |
| M3 | | 1 | | | 1 | |
| M4 | | 1 | | | 1 | |

Tabla 2.4. Relación de piezas y las máquinas asociadas a sus procesos de fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificadas y relacionadas piezas con máquinas se agrupan las piezas en familias que compartan las mismas operaciones de fabricación.

| Piezas | | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| Máquinas | P1 | P3 | P4 | P6 | P2 | P5 |
| M1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| M2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| M3 | | | | | 1 | 1 |
| M4 | | | | | 1 | 1 |

Tabla 2.5. Familias de piezas agrupadas por máquinas comunes en la fabricación. Fuente: Elaboración propia.

La generación de familias de piezas que comparten operaciones de fabricación y su agrupación por máquinas, concentrando éstas en zonas separadas dentro de la planta de producción, derivó en una aplicación de la tecnología de grupos: la **fabricación o manufactura celular**. Este tipo de fabricación se beneficia de las ventajas que la agrupación de piezas en familias y, en definitiva, la tecnología de grupos aportan a los procesos de manufactura:

- Promueve la estandarización de procesos, de operaciones en máquinas y de herramientas de trabajo.
- Mejora y simplifica el diseño de los productos.
- Disminuye el tiempo de manipulación y transporte de material, ya que el producto se desplaza por una célula de fabricación y no por toda la fábrica.
- Reduce la planificación de procesos y el tiempo de producción.
- Mejora la calidad del producto, reduciendo el número de desperfectos.
- Se obtiene un mayor control de inventario y del material disponible gracias a la clasificación y codificación de las piezas.
- Responde rápidamente a los cambios de programación de la producción.

Por el contrario, la implantación de la metodología de la tecnología de grupos requiere un tiempo y una inversión inicial para planificar el reordenamiento de las máquinas en células de fabricación y para identificar, clasificar y codificar los distintos productos en familias.

2.3. Características de la Fabricación Celular

Como se ha visto en las secciones anteriores, la fabricación celular tiene su origen en la tecnología de grupos y es un sistema de producción que organiza sus estaciones de trabajo mediante células de fabricación, donde se explotan las similitudes entre piezas de una misma familia.

Los objetivos principales que se pretenden lograr mediante la implantación de la fabricación celular son la reducción del tiempo de preparación de máquinas y equipos y la disminución del tiempo de fabricación global. La consecución de estos objetivos supone la reducción de inventarios y el tiempo de respuesta a la demanda. Además, la fabricación celular facilita el trabajo autónomo, fomentando la mejora de los procesos y de la calidad.

2.3.1. La célula de fabricación

Una célula de fabricación es una unidad o estación de trabajo autosuficiente en la que máquinas, equipos y personas se disponen secuencialmente para realizar total o parcialmente un proceso determinado. Esta disposición reduce los desplazamientos de las personas, los transportes internos, el inventario y los espacios ocupados por equipos y máquinas, facilitando un flujo suave y regular del material y piezas procesadas.

Es importante no confundir una célula de fabricación con un conjunto de máquinas similares que realizan un proceso y que están situadas próximas unas de otras. Para ello se definen los siguientes aspectos que caracterizan a las células de fabricación:

- Cada célula se encarga de producir una cierta familia de piezas o productos.
- Cada célula cuenta con todas las máquinas, instalaciones o equipos necesarios para la fabricación de su familia de productos.
- Los objetivos de cada célula se conciben como un todo y están bajo la supervisión del jefe de producción de la célula.
- Dentro de cada célula existe un cierto grado de flexibilidad y cuenta con un grupo de trabajadores que se encargan únicamente del control y seguimiento del trabajo.
- Cada célula lleva a cabo la inspección y la programación de las distintas operaciones del proceso.

Por tanto, cada célula constituye un complejo sistema socio-técnico en el que personas y máquinas interactúan continuamente. Esto convierte su diseño en un proceso exhaustivo y minucioso que lejos queda de ser una simple agrupación de máquinas con tareas similares.

2.3.1.1. Concepto de pieza compuesta

Los miembros de una familia de piezas comparten atributos de diseño y/o características de fabricación. Generalmente las características de diseño conllevan unas operaciones de fabricación determinadas. Por ejemplo, los orificios en las piezas se hacen mediante taladrado y las formas redondas, mediante torneado.

Normalmente, una pieza de la familia contiene algunas de las características de la familia, pero no todas. Una *pieza compuesta* es una pieza hipotética que incluye todos los atributos de diseño y manufactura de la familia. La célula de fabricación se diseña en base a esta pieza compuesta, para incluir todas las máquinas que realizan la fabricación completa de la misma. De este modo, la célula puede producir cualquier pieza de la familia, sin más que omitir las operaciones que no sean necesarias.

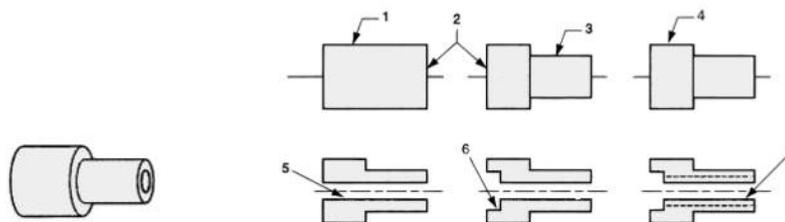


Figura 2. 8. A la izquierda, pieza compuesta de una familia de piezas rotatorias. A la derecha, las características individuales de la pieza compuesta. Fuente [2].

| Número | Características de diseño | Operación de fabricación asociada |
|--------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Cilindro externo | Torneado |
| 2 | Cara del cilindro | Careado |
| 3 | Paso cilíndrico | Torneado |
| 4 | Superficie lisa | Esmerilado cilíndrico externo |
| 5 | Orificio axial | Taladrado |
| 6 | Abocardado | Perforado |
| 7 | Roscas internas | Roscado |

Tabla 2.6. Características de diseño y operaciones de manufactura de la pieza compuesta de la figura 2.8. Fuente [2].

2.3.1.2. Diseño de una célula

El diseño de cada célula es un ejercicio complejo que involucra tanto a la organización de la empresa como a los departamentos de diseño, producción, finanzas y ventas. Este proceso de diseño comprende aspectos relacionados tanto con la estructura de la célula como con el control y gestión de la misma. El proyecto de diseño se puede llevar a cabo mediante el siguiente procedimiento:

1. **Formación de familias y elección de productos a fabricar.** Haciendo uso de los procedimientos de clasificación y codificación de piezas o productos de la tecnología de grupos, se agrupan los productos por familias y se establece el grupo de productos y la cantidad que se desea fabricar.
2. **Selección de máquinas y equipos para la fabricación.** De acuerdo a las especificaciones en el diseño de dichos productos se estudia el tipo y el número de máquinas que son necesarios para la fabricación de los mismos. De igual forma se identifican las herramientas y el utillaje para cada operación del proceso. Esta se convierte en la fase más crítica del proceso de diseño, ya que se dejan entrever las limitaciones en cuanto al proceso de fabricación; la necesidad de inversiones elevadas para adquirir nuevas máquinas puede desestimar la formación de la célula.
3. **Establecimiento de la secuencia y operaciones de trabajo.** Definidos los productos a fabricar y contando con las máquinas necesarias para ello, se determinan todas las operaciones del proceso de fabricación de cada pieza y la secuencia las mismas. Se detallan los siguientes aspectos: número y tipo de operaciones en cada máquina, tiempo de fabricación destinado a cada operación, tiempo de fabricación total de cada pieza, recorrido del material por la célula, suministro de material a las máquinas, número de operarios por célula y ocupación de cada operario.
4. **Medición de la demanda y sincronización con el tiempo de fabricación.** Para que un sistema productivo sea eficiente, debe producir de acuerdo a la demanda, teniendo en cuenta los cambios y fluctuaciones, los requerimientos y exigencias del cliente. Para ello es muy importante la sincronización del tiempo de fabricación de un producto con la demanda y la entrega a tiempo del producto demandado. De esta forma se reducen los inventarios fabricando sólo lo que el cliente dicta.
5. **Equilibrado de procesos.** La optimización de la producción es siempre una meta a conseguir. Con el equilibrado o balanceo de la línea de fabricación se consigue que todas las máquinas estén ocupadas en cada momento, reduciendo el tiempo de fabricación y aumentando así la productividad.
6. **Diseño del layout.** Para llevar a cabo la distribución de los distintos equipos dentro de la célula es necesario la determinación del layout según el flujo de material y de las operaciones. La distribución en planta es esencial para el diseño de la célula, ya que minimiza y optimiza los espacios ocupados por las máquinas y organiza los recorridos de personas y productos.



Figura 2. 9. Pasos en el diseño de una célula. Fuente: Elaboración propia.

A lo largo de todo el procedimiento se evalúan constantemente decisiones relacionadas con el proceso de fabricación y la estructura de la célula: inversiones en equipos y herramientas, costes de manipulación y transporte dentro de la célula, inventarios dentro del proceso, requerimiento de espacio, flexibilidad de operaciones y retraso en el trabajo. De estas decisiones dependerá el resultado final del diseño.

El proceso de diseño de las células de fabricación depende de cada empresa, por lo que no siempre constará exactamente de los mismos pasos ni en el mismo orden que los mostrados en esta subsección. Sin embargo, la idea esencial y los objetivos a conseguir en el diseño de la célula no difieren: producir una serie de piezas similares en cuanto a procesos de fabricación mediante una distribución eficiente de los equipos y llevar a cabo su total o parcial fabricación de forma autónoma.

2.3.1.3. Tipos de células y layout

De acuerdo a la tecnología de grupos, existen tres tipos de células de fabricación según el número de máquinas y el recorrido del material a lo largo del proceso de fabricación.

- **Célula de máquina única.**

Este tipo de célula se compone de una sola máquina que se opera manualmente y dispone de las herramientas, fijaciones, soportes y útiles necesarios para la fabricación de las distintas variantes dentro de la familia de piezas. La célula de máquina única se emplea cuando se realizan operaciones básicas de mecanizado, como torneado o fresado.

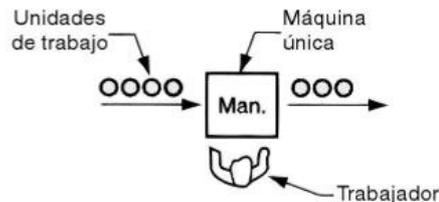


Figura 2. 10. Célula de máquina única. Fuente [2].

- **Célula de múltiples máquinas con manipulación manual de material.**

Esta célula consta de dos o más máquinas que llevan a cabo las operaciones de fabricación de forma manual, en la que los trabajadores mueven las piezas dentro de la célula y las colocan en las distintas máquinas para su procesado. La distribución en planta más usada para este tipo de células es la distribución en forma de U o C, en la que las máquinas se disponen formando una curva pretendiendo que el punto de inicio del ciclo de procesado esté cerca del punto final, lo que minimiza la distancia que el operario tiene que recorrer para comenzar el siguiente ciclo.

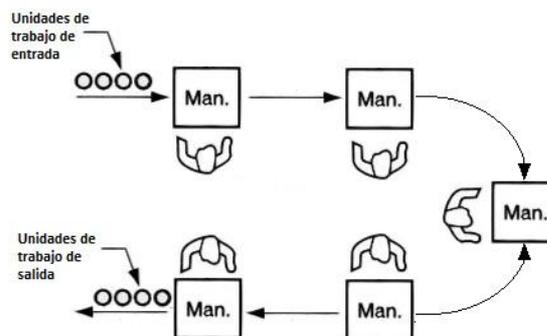


Figura 2. 11. Célula en forma de U. Fuente [2].

El layout en forma de U es el más apropiado cuando existen variaciones en el flujo de trabajo entre las piezas procesadas en la célula. Además esta distribución permite a los operarios moverse rápidamente dentro de la célula. Otra de las ventajas de disponer los equipos en forma de U, es que no se necesita un operario por máquina, sino que debido a la proximidad de las mismas, un operario puede encargarse de más de un equipo de trabajo.

- **Célula de múltiples máquinas con manipulación semi-integrada de material.**

Esta modalidad emplea dos o más máquinas con las que se opera de forma manual y un sistema de transporte de piezas automático, de forma que los operadores ya no se encargan de mover el producto para que sean procesadas por las diferentes máquinas. El sistema de transporte de piezas suele ser una cinta transportadora alrededor de la cual se colocan las máquinas; puede tener forma de línea recta, de bucle o rectangular, como se muestra en la figura 2.12.

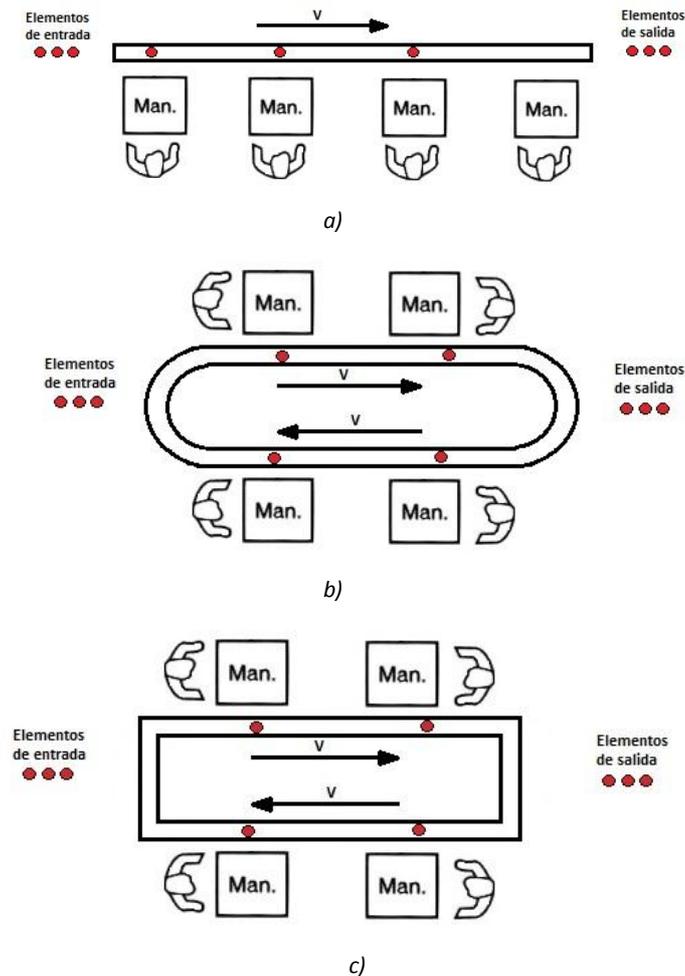


Figura 2. 12. Células de múltiples máquinas y manipulación de material automática en forma de a) línea recta, b) de bucle y c) rectangular. Fuente [2].

La manipulación semi-integrada se emplea bien para transportar piezas de gran peso o tamaño, o bien, para aumentar la velocidad de producción.

La elección del tipo de célula depende principalmente de tres factores: recorrido del producto en la célula, cantidad de trabajo a realizar y atributos físicos del producto. En primer lugar, dentro de la célula las piezas pueden experimentar cuatro tipos de movimientos; *operación repetida*, en la que la pieza necesita ser procesada por una misma máquina varias veces; *movimiento en secuencia*, en el que el producto va pasando por las diferentes máquinas, una tras otra; *movimiento de paso*, en el que las piezas pasan de una máquina a otra distinta, saltándose algunas; y *movimiento hacia atrás*, en el que un producto necesita volver a procesarse en una estación anterior. En segundo lugar, la cantidad de trabajo o el número de piezas al año que se han de producir determina la carga de trabajo en la célula. Esto se traduce en número de máquinas necesarias para hacer frente a la producción anual, en costes de producción y en rentabilidad de la formación de la célula. Por último, las dimensiones y demás atributos físicos del producto determinan la necesidad o no de un transporte automatizado de piezas. De este modo, las células en forma de U resultan adecuadas cuando el producto requiere movimientos de paso. Cuando la producción solicita movimientos en secuencia se puede emplear células en línea recta o en forma de U indistintamente. Sin embargo, si se necesitan movimientos hacia atrás en la secuencia de operaciones resulta más adecuado emplear células en bucle o rectangulares.

Una vez elegido el tipo de célula más adecuado, el siguiente punto clave a abordar es la disposición de los equipos, en cuanto a distancia entre los mismos se refiere. Por lo general, en una célula trabajan en equipo de 2 a 10 operarios, por lo que los equipos y máquinas deben estar correctamente espaciados para no entorpecer en el flujo normal de circulación de personas y material. Para establecer la correcta distribución de la maquinaria se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- **Libertad de movimiento.** El trabajo dentro de la célula requiere que los operarios se muevan entre las diferentes áreas para comunicarse y asistirse unos a otros. Las cintas transportadoras de material, los pequeños almacenes intermedios o los equipos pueden entorpecer dicho movimiento. Esto dificulta la comunicación y afecta tanto a la productividad como a la motivación y la estimulación del operario.
- **Libertad de visión.** Los miembros del equipo deben ser capaces de verse unos a otros y a las operaciones de la célula. La comunicación visual fomenta la confianza y el control de cada situación de trabajo y del proceso global de producción. Las divisiones entre paredes y los grandes equipos interfieren en el trabajo en grupo y confiere aislamiento y soledad.
- **Proximidad de comunicación verbal.** Como ya se ha comentado, los operarios necesitan interactuar unos con otros, comunicando órdenes, ayudando a los compañeros o supervisando el correcto funcionamiento del proceso. Mientras que las señales visuales y sonoras son perceptibles a gran distancia, la comunicación verbal requiere de proximidad y acercamiento de los operarios.
- **Control visual.** El control visual mediante luces y tableros informativos permite verificar el correcto funcionamiento de las operaciones sin necesidad de comunicación verbal. Es una forma rápida y sencilla de informar a los trabajadores de problemas, averías en las máquinas, desperfectos en productos, retraso de la producción o nivel de inventario, entre otros.
- **Espacio suficiente para mantenimiento.** Las operaciones de mantenimiento requieren de un espacio lo suficientemente amplio en torno a la máquina para que los operarios encargados de dicho proceso puedan llevarlas a cabo cómodamente, sin que las máquinas o equipos de trabajo adyacentes interrumpen o dificulten el mantenimiento.

En definitiva, se ha de elegir un layout y el tipo de célula de fabricación que añada y busque la calidad en sus procesos y productos y que fomente la interacción y el trabajo en equipo.

2.3.2. Procedimientos de formación de células

Hasta el momento se han identificado de forma general los tipos de células y las disposiciones típicas de las máquinas en células y se han descrito los aspectos a tener en cuenta en el diseño de las mismas a partir de un determinado número de máquinas y equipos de trabajo. Sin embargo, el problema al que se enfrentan muchas empresas es la agrupación de las estaciones de trabajo totales de una fábrica en células de fabricación.

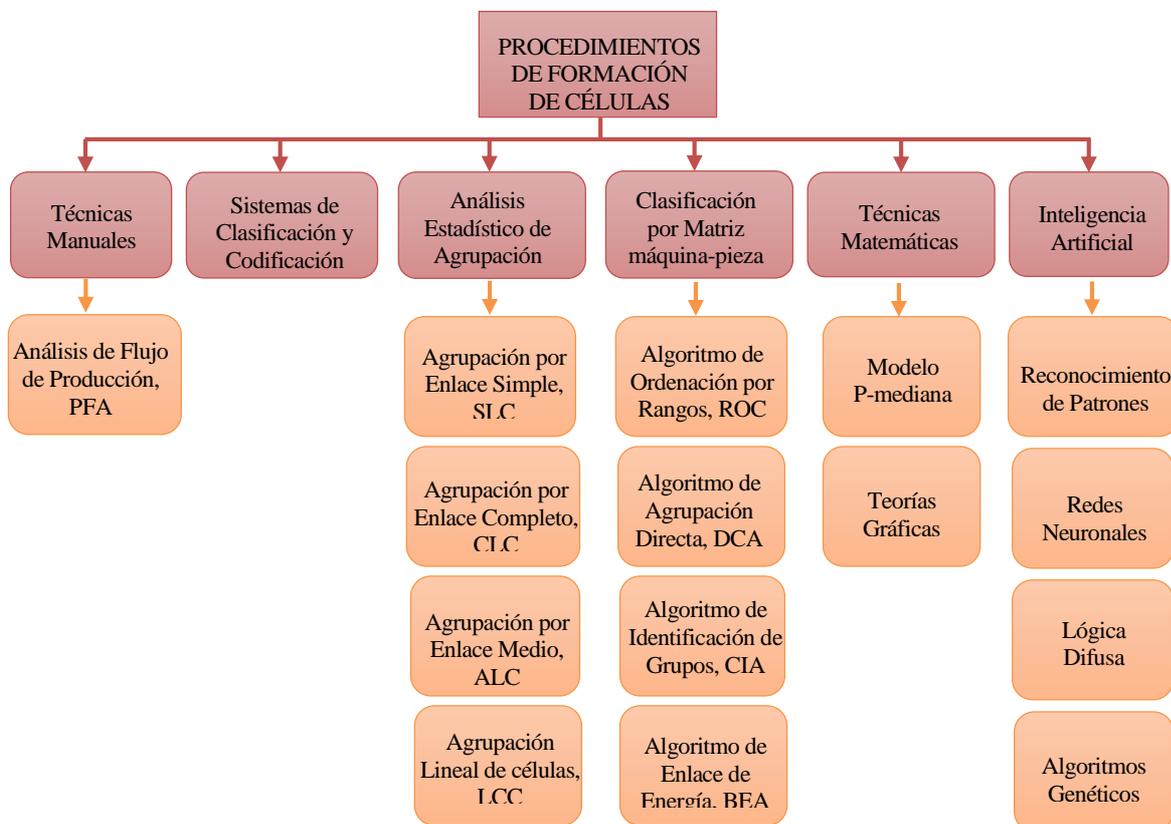


Figura 2. 13. Clasificación de los procedimientos de formación de células. Fuente: Elaboración Propia.

En esta subsección se van a describir los principales métodos de formación de células. La mayoría de ellos hacen uso de procedimientos y algoritmos matemáticos para la ordenación de máquinas en células. Dichos algoritmos pueden resultar algo laboriosos para el lector y para la idea que en este trabajo se pretende desarrollar, por lo que se describirán de forma general.

2.3.2.1. Técnicas manuales

Las técnicas manuales identifican y asocian las familias de piezas con sus correspondientes máquinas y procesos de fabricación. Reciben el nombre de “manuales” porque dependen del criterio del trabajador que realice la clasificación y porque no pueden ser implementadas por un ordenador.

La técnica manual más significativa es el *análisis de flujo de producción* (Production Flow Analysis, PFA), también empleado para la clasificación de piezas en familias [Sección 2.2]. Esta técnica, desarrollada por John L. Burbidge en múltiples publicaciones entre 1963 y 1977, se basa en la idea de que las piezas con operaciones en común se agrupan e identifiquen como una familia junto con las máquinas asociadas para formar una célula. Este procedimiento comprende cuatro pasos:

1. **Análisis de flujo de fábrica.** El primer paso consiste en la división de la fábrica en niveles, identificando los flujos de operaciones que se realizan en las máquinas.
2. **Análisis de grupos.** El segundo paso es identificar las familias de piezas que se fabrican en cada grupo de máquinas. Constituye la parte más importante del método.
3. **Análisis de línea.** El tercer paso es el diseño del layout de la célula para determinar la ubicación más conveniente de cada máquina.
4. **Análisis de herramientas.** El cuarto y último paso consiste en analizar las características físicas de las piezas, material y herramientas necesarias para la secuencia de operaciones de fabricación.

Esta técnica manual resulta fácilmente comprensible, sin embargo, la formación de células puede resultar lenta y poco objetiva, ya que depende del criterio que emplee el responsable del trabajo.

2.3.2.2. Sistemas de clasificación y codificación

Los sistemas de clasificación y codificación emplean códigos alfanuméricos para designar las características de diseño y los procesos de fabricación de las piezas. La descripción de estas técnicas fue desarrollada en la sección 2.2 para la clasificación de piezas en familias. De este modo, las piezas con atributos similares se agrupan en una misma célula para ser procesadas.

2.3.2.3. Análisis estadístico de agrupación

El análisis estadístico de agrupación, también conocido como agrupamiento jerárquico, es otra técnica que puede ser usada para clasificar piezas en familias y máquinas en células. Se basa en la cuantificación del grado de similitud o diferencia entre dos piezas o máquinas. Esta cuantificación se lleva a cabo mediante coeficientes de semejanza, que se calculan para cada par de piezas o máquinas y se colocan en una matriz. Existen varios métodos jerárquicos de agrupación pero todos ellos se basan en la ejecución de los siguientes pasos:

- En una matriz, colocar en las columnas las piezas o máquinas que se desean analizar y en las filas los atributos de cada pieza o máquina.
- Usando la matriz de datos anterior, calcular los coeficientes de semejanza para medir la similitud o diferencia entre piezas o máquinas.
- Con el método de agrupación empleado, se usan los coeficientes de proximidad para trazar un árbol o *dendograma*, donde se muestran las similitudes entre piezas o máquinas.

Los principales métodos jerárquicos son la *Agrupación por Enlace Simple* (Simple Linkage Clustering, SLC), la *Agrupación por Enlace Completo* (Complete Linkage Clustering, CLC), la *Agrupación por Enlace Medio* (Average Linkage Clustering, ALC) y la *Agrupación Lineal de Células* (Linear Cell Clustering, LCC).

El método de *agrupación por enlace simple* fue desarrollado por J. McAuley en 1972 para agrupar máquinas en células. El coeficiente de semejanza se define entre dos máquinas atendiendo al número de piezas que se procesan en cada una. De esta forma, se establece una matriz para cada grupo formado por un par de máquinas, como se muestra en la tabla 2.7. Como la matriz está formada por dígitos binarios, se pueden formar cuatro combinaciones de números: 1-1, 1-0, 0-1, 0-0.

| | | Máquina j | |
|-----------|---|-----------|---|
| | | 1 | 0 |
| Máquina i | 1 | a | b |
| | 0 | c | d |

Tabla 2. 7. Máquinas a analizar. Fuente [3].

En la tabla anterior, a es el número de piezas que se procesan en ambas máquinas, b es el número de piezas que sólo visitan la máquina i , c muestra el número de piezas que sólo visitan la máquina j y d es el número de piezas que no son procesadas en ninguna de las máquinas. Conociendo el número asociado a cada letra, se puede calcular el *coeficiente de semejanza de Jaccard*, que es el más empleado y puede calcularse con la siguiente ecuación: $S_{ij} = a/(a + b + c)$ con $0 \leq S_{ij} \leq 1$. El máximo grado de semejanza, cuando ambas máquinas producen el mismo tipo de piezas, se da para $b = c = 0$ y $S_{ij} = 1$. Por el contrario, el mínimo grado de semejanza se da para $a = 0$ y $S_{ij} = 0$.

Una vez que los coeficientes de semejanza se determinan para cada par de máquinas, SLC evalúa la similitud entre dos grupos de máquinas de la siguiente forma: la pareja de máquinas, o la máquina y el grupo, o los dos grupos que compartan mayor similitud se agrupan juntos. Este proceso se repite con todas las máquinas hasta obtenerlas todas agrupadas en un solo grupo.

El método de *agrupación por enlace completo* es justo al contrario que el método SLC, combina dos máquinas que tengan la mínima similitud entre ellas. Respecto a la implementación del método, no existen más diferencias respecto al SLC.

El método de *agrupación por enlace medio* es distinto a los anteriores. SLC y CLC agrupan máquinas atendiendo a un solo criterio. En lugar de eso, el ALC considera un promedio de todos los enlaces que pueden establecerse dentro de una célula a partir de grupos de una sola máquina.

Por último, la *agrupación lineal de células*, desarrollada por Wei y Kern en 1989, se basa en la semejanza entre dos máquinas según una puntuación en común. Esta puntuación no solo recoge el número de piezas que necesitan ser procesadas en una máquina, sino también las piezas que no necesitan de ninguna de las dos máquinas. Es un procedimiento flexible, que puede ser adaptado para considerar limitaciones en cuanto al tamaño y número de máquinas de la célula.

2.3.2.4. Clasificación por matriz máquina-pieza

Son numerosos los métodos existentes de ordenación de filas y columnas de matrices para clasificar máquinas en células de fabricación. En la mayoría de ellos la ordenación de máquinas conlleva a la formación de bloques independientes en torno a la diagonal de la matriz, por lo que se suelen conocer como *métodos por bloques diagonales*. Los más importantes son: el *Algoritmo de Ordenación por Rangos* (Rank Order Clustering, ROC), el *Algoritmo de Agrupación Directo* (Direct Clustering Algorithm, DCA), el *Algoritmo de Identificación de Grupos* (Cluster Identification Algorithm, CIA) y el *Algoritmo de Enlace de Energía* (Bond Energy Algorithm, BEA).

El *algoritmo de ordenación por rangos* o ROC es, quizás, el procedimiento de formación de células más conocido, debido a su sencillez y facilidad de comprensión e implementación. Fue desarrollado por King en 1980 y constituye un método de rápida convergencia. Las filas y columnas de la matriz pieza-máquina se completan mediante palabras binarias, es decir, si una máquina (columna) está asociada a la fabricación de una pieza (fila), en la casilla correspondiente a la intersección de la fila y la columna se coloca un 1. Luego mediante una ponderación establecida en filas y columnas se ordenan éstas para la formación de células. El algoritmo se resume en los siguientes pasos:

1. En una matriz se colocan las diferentes piezas en las columnas y las máquinas asociadas en las filas. Se marca con un 1 la casilla de intersección de cada pieza con las máquinas que intervienen en su fabricación.
2. Se asigna una ponderación a cada columna y se suma el valor final de cada fila. La ponderación consiste en una serie de potencias de base 2, tal y como se muestra en la tabla 2.8. Posteriormente se suman los valores de cada fila.
3. Se ordenan las filas en orden descendente de acuerdo a los valores obtenidos en el paso anterior.
4. Se emplea la misma ponderación del tercer paso en las filas y se suman los valores de las columnas.

5. Se ordenan las columnas en orden descendente de acuerdo a los valores obtenidos en el paso anterior.
6. Se repite el proceso, si es necesario, hasta que converja el orden de filas y columnas.

A modo de ejemplo se propone el siguiente caso, en el que se tienen 9 tipos de piezas y 7 máquinas asociadas a las operaciones que tienen que realizarse sobre las distintas piezas. De esta forma, tal y como se ilustra en la tabla 2.8, la pieza 1 debe pasar por las máquinas 1 y 5 para su completa fabricación, mientras que la pieza 9 requiere de las máquinas 2, 3 y 6. Identificadas las relaciones entre piezas y máquinas se aplica la ponderación de potencias de base dos (fila azul de la tabla 2.8) a las columnas y se suman las potencias correspondientes a las casillas que contengan un 1 en cada fila (columna naranja).

| | | Piezas | | | | | | | | | |
|----------|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Máquinas | 1 | 1 | | | 1 | | | | 1 | | 290 |
| | 2 | | | | | 1 | | | | 1 | 17 |
| | 3 | | | 1 | | 1 | | | | 1 | 81 |
| | 4 | | 1 | | | | 1 | | | | 136 |
| | 5 | 1 | | | | | | | 1 | | 258 |
| | 6 | | | 1 | | | | | | 1 | 65 |
| | 7 | | 1 | | | | 1 | 1 | | | 140 |
| | | 2^8 | 2^7 | 2^6 | 2^5 | 2^4 | 2^3 | 2^2 | 2^1 | 2^0 | |

Tabla 2. 8. Pasos 1 y 2 del método ROC. Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente, se ordenan las filas por orden decreciente (columna amarilla de la tabla 2.9), se aplica la misma ponderación a las filas (fila azul) y se suman las potencias según los unos de cada columna (fila naranja).

| | | Piezas | | | | | | | | | | |
|----------|---|--------|----|---|----|---|----|----|----|---|-----|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| Máquinas | 1 | 1 | | | 1 | | | | 1 | | 290 | 2^6 |
| | 5 | 1 | | | | | | | 1 | | 258 | 2^5 |
| | 7 | | 1 | | | | 1 | 1 | | | 140 | 2^4 |
| | 4 | | 1 | | | | 1 | | | | 136 | 2^3 |
| | 3 | | | 1 | | 1 | | | | 1 | 81 | 2^2 |
| | 6 | | | 1 | | | | | | 1 | 65 | 2^1 |
| | 2 | | | | | 1 | | | | 1 | 17 | 2^0 |
| | | 96 | 24 | 6 | 64 | 5 | 24 | 16 | 96 | 7 | | |

Tabla 2. 9. Pasos 3 y 4 del método ROC. Fuente: Elaboración Propia.

Se ordenan las columnas en orden descendente (fila amarilla de la tabla 2.10) y se repite el proceso hasta que converja. En este caso, tras aplicar de nuevo la ponderación a las columnas y sumar las filas, se comprueba que no es necesario reordenar las filas, por lo que el método ha convergido.

| | | Piezas | | | | | | | | | |
|----------|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | 1 | 8 | 4 | 2 | 6 | 7 | 9 | 3 | 5 | |
| Máquinas | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 448 |
| | 5 | 1 | 1 | | | | | | | | 384 |
| | 7 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 56 |
| | 4 | | | | 1 | 1 | | | | | 48 |
| | 3 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 7 |
| | 6 | | | | | | | 1 | 1 | | 6 |
| | 2 | | | | | | | 1 | | 1 | 5 |
| | | 96 | 96 | 64 | 24 | 24 | 16 | 7 | 6 | 5 | |
| | | 2^8 | 2^7 | 2^6 | 2^5 | 2^4 | 2^3 | 2^2 | 2^1 | 2^0 | |

Tabla 2. 10. Pasos 5 y 6 del método ROC. Fuente: Elaboración Propia.

En este ejemplo se han formado claramente tres células. La primera está formada por las máquinas 1 y 5 y se encargan de la fabricación de las piezas 1, 4 y 8. La segunda célula está formada por las máquinas 4 y 7 y producen las piezas 2, 6 y 7. Por último, la tercera agrupación consiste en las máquinas 2, 3 y 6 y realizan operaciones sobre las piezas 3, 5 y 9.

Chan y Milner desarrollaron en 1982 un procedimiento similar al ROC, el *algoritmo de agrupación directo* o DCA, para reordenar la matriz pieza-máquina. Una vez completada la matriz con las relaciones correspondientes entre piezas y máquinas, el procedimiento consiste en los siguientes pasos:

1. Sumar el número de unos en cada fila y en cada columna.
2. Ordenar las columnas (de izquierda a derecha) en orden decreciente de unos. Si hay más de una columna con el mismo número de unos se coloca primero la que esté más a la derecha de la matriz.
3. Ordenar las filas en orden ascendente (de arriba hacia abajo). Si hay más de una fila con el mismo número de unos se coloca primero la que esté más a abajo de la matriz.
4. Ordenar las columnas colocando a la izquierda las columnas que tienen un uno en la primera fila.
5. Ordenar las filas colocando los unos lo más arriba de la matriz para formar bloques.

Repitiendo este método iterando algunas veces, se consiguen celdas independientes en torno a la diagonal de la matriz.

En 1968 Iri propuso otro de los métodos que determinan bloques independientes de máquinas, el *algoritmo de identificación de grupos* o CIA. El método consiste en ir tachando (trazar líneas verticales u horizontales) unos de filas y columnas; empezando por la primera fila, se tachan todas las columnas que tienen un uno en esa fila. Posteriormente se tachan las filas que tienen un uno en esas columnas. El proceso se repite hasta que el número de filas y columnas deje de aumentar.

Por último, el *algoritmo de enlace de energía* o BEA fue desarrollado en 1972 por McCormick, Schweitzer y White. El método toma como entrada la matriz y va permutando filas y columnas hasta agrupar las máquinas por células. La diferencia con los métodos anteriores es que el BEA realiza las permutaciones de manera que se maximiza un parámetro, definido como *medida de efectividad*.

2.3.2.5. Técnicas matemáticas

Existe una amplia variedad de técnicas matemáticas para la formación de células. Dependiendo del método y del objetivo, se puede obtener un enfoque secuencial o simultáneo en dicho proceso. Los modelos más característicos son el modelo *P-mediana* y el modelo de *Teorías Gráficas*.

El modelo *P-mediana* fue desarrollado por Rusiak en 1987 para identificar familias de piezas. Es considerado el primer procedimiento de programación matemática. La programación matemática se emplea para reducir el tiempo de mecanizado de las máquinas, minimizar la transferencia de piezas entre células, minimizar las inversiones en nuevos equipos y mantener un nivel de utilización aceptable. El modelo *P-mediana* se usa para agrupar n productos en p familias de productos con el objetivo de maximizar la suma total de las similitudes entre cualquier par de tipos de productos.

Por otro lado, Rajagopalan y Batra desarrollaron en 1975 un modelo de formación de células basado en *teorías gráficas*. En este método, el coeficiente de semejanza de Jaccard se calcula para cada par de máquinas. Luego, se define un gráfico en el que cada vértice representa una máquina y las líneas representan las relaciones entre las máquinas. Una línea conecta dos vértices sólo si el coeficiente de semejanza del par de máquinas es mayor que un cierto valor umbral. Las células se forman colocando cerca los distintos grupos en los que cada par de máquinas están relacionadas mediante el coeficiente de semejanza y uniéndolos entre sí.

2.3.2.6. Inteligencia artificial

Los métodos de *Reconocimiento de Patrones*, *Redes Neuronales*, *Lógica Difusa* y *Algoritmos Genéticos* se incluyen dentro de las técnicas denominadas de inteligencia artificial. Estas técnicas conforman un área emergente de investigación de procedimientos.

Venugopal propuso en 1985 el uso de *patrones de reconocimiento sintáctico* para la formación de células. El reconocimiento de patrones intenta representar patrones complejos a partir de sub-patrones simples y relaciones entre sub-patrones, siendo éstos fáciles de reconocer. El procedimiento de Venugopal consiste en cuatro pasos: selección primaria, análisis de agrupación, conclusión gramatical y reconocimiento sintáctico.

El procedimiento de formación de células mediante *redes neuronales* pretende establecer sistemas de procesamiento de información simulando el proceso de aprendizaje biológico, igual que las neuronas cerebrales generan decisiones inteligentes. Consiste en diferentes componentes: unidades de procesamiento, conexiones, pautas de propagación y aprendizaje y funciones de transferencia de datos. Las unidades de procesamiento se unen mediante conexiones ponderadas. Cada peso o ponderación representa la intensidad de las conexiones. Cada unidad recibe señales de entrada y luego mediante la aplicación de funciones lineales o no lineales se suman las señales y se envía una señal de salida a todas las unidades que estén conectadas a la unidad de procesamiento.

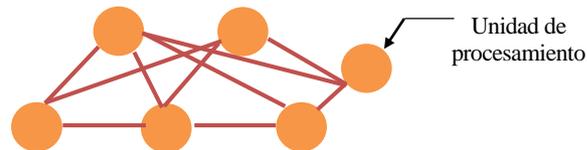


Figura 2. 14. Ejemplo de Redes Neuronales.
Fuente: Elaboración Propia

El tercer método es el modelo de *lógica difusa*. El nombre de *conjunto difuso* sugiere que un elemento puede ser o no parte de un conjunto. Por una parte, los conjuntos difusos permiten que los elementos sean parte del conjunto mediante la asociación de un grado de pertenencia que varía de 1 a 0 dependiendo si pertenece o no al grupo. Los modelos difusos son adecuados para hacer frente a las imprecisiones que pueden existir en la agrupación de máquinas.

Los *algoritmos genéticos*, desarrollados por Holland en 1992, están basados en analogías de los procesos naturales de evolución, en cómo las especies evolucionan para adaptarse a los cambios de la naturaleza y la supervivencia del más fuerte. Este método se emplea para conseguir una técnica flexible y eficiente de agrupación y formación de células. Emplea una representación esquemática que incluye únicamente las máquinas necesarias para la fabricación, eliminando las prescindibles y reduciendo el tamaño de la célula. El algoritmo genético depende de seis conceptos: representación, inicialización, función de evaluación, reproducción, cruce y mutación. El proceso es el siguiente: la solución candidata se representa mediante números binarios y es llamada cromosoma. La correcta selección de un grupo de cromosomas se llama población y a la población en un determinado espacio de tiempo, generación. El algoritmo lleva a cabo tres procesos sobre dicha generación: reproducción de los cromosomas más fuertes, cruce y mutación de los cromosomas. Los cromosomas resultantes de las operaciones se llaman descendientes de la siguiente generación. Este proceso se lleva a cabo de forma iterativa hasta que la población coincide o hasta que se decide cesar la mejora del sistema.

2.3.3. Beneficios de la fabricación celular

Un sistema de fabricación basado en células de fabricación hace a la empresa más competitiva y aporta numerosas ventajas a la producción y a los trabajadores involucrados. Los principales beneficios de la fabricación celular son:

- La reducción de los costes de transporte interno y los retrasos en el proceso.
- El acortamiento de los plazos de producción; atendiendo mejor a las necesidades de los clientes; facilitando la oportunidad de poder aumentar, si fuera necesario, la capacidad de producción sin inversiones adicionales, mejorando así la rentabilidad de las inversiones iniciales.
- El ahorro de espacio en la fábrica, que puede emplearse para otros propósitos.
- La reducción de la cantidad de stock en el área de trabajo, creando un entorno más ordenado en el que el trabajo puede realizarse de forma más fácil.
- La disminución y acortamiento de los desplazamientos de personas para la ejecución de procesos.
- La rápida identificación de los problemas y sus causas que puedan conllevar retrasos en la fabricación.

Por otra parte, la implantación de células de fabricación implica un proceso formativo de los operarios en sus tareas dentro de la célula, lo que aumentará el número de sus habilidades y conocimientos, convirtiéndolos en operarios más flexibles y con mayor capacidad de respuesta y autonomía.

2.4. Automatización de la producción

La *automatización* es el conjunto de tecnologías asociadas al uso de dispositivos y máquinas programadas para realizar tareas prefijadas de forma parcial o totalmente autónoma. Suponen la sustitución del operador humano por sistemas informáticos que controlan las operaciones de la producción.

Existen muchos sistemas automatizados dentro de una planta de producción: máquinas-herramienta, robots industriales, sistemas de inspección y control de calidad, máquinas de ensamblaje y montaje, sistemas automáticos de cambio de herramienta y sistemas de almacenaje automático de material, entre otros.

Es importante identificar qué sistemas de fabricación se desean automatizar y la razón de dicha automatización; las operaciones más adecuadas para llevarse a cabo automáticamente son las más mecánicas y repetitivas. No siempre resulta imprescindible automatizar y en ocasiones puede conllevar costes elevados innecesarios. La automatización no favorece la flexibilidad, por lo que su implantación es más conveniente para las producciones en línea y en serie que para la producción funcional y la producción por lotes. Sin embargo, existen opciones de automatización para procesos poco repetitivos y flujos irregulares. Estos sistemas son mucho más complejos en los que todas las operaciones se gestionan informáticamente y se pueden modificar completamente de forma rápida. Los sistemas de fabricación flexibles y las células flexibles de fabricación emplean este tipo de automatización.

En la actualidad, los sistemas de fabricación automatizados cobran cada vez más importancia en las instalaciones de producción de muchas empresas. Esto es debido a las numerosas ventajas que proporciona: aumenta la productividad, mejora la calidad del producto, disminuye el tiempo de entrega, reduce los costes laborales, mitiga la escasez de mano de obra, se logran tareas imposibles de realizar de forma manual y reduce las tareas manuales rutinarias, aumentando la seguridad del personal.

2.4.1. Tipos de automatización

Se definen tres formas de automatización atendiendo al tipo de producción que se desee obtener, en términos de cantidad y variedad de productos, y de la capacidad de modificación y fabricación de distintos diseños: automatización fija, programable o flexible.

▪ *Automatización Fija*

Mediante este tipo de automatización la secuencia de operaciones de procesamiento está fijada por la configuración del equipo. La sucesión de operaciones simples, coordinadas y secuenciadas, permiten obtener piezas de gran complejidad. Sus características son las propias de la producción en masa:

- Gran inversión inicial en equipos personalizados y diseñados a medida.
- Altas tasas de producción. Rentable para cantidades elevadas de producción.
- Produce un único tipo de producto, por lo que resulta casi inflexible para acomodar variaciones.

▪ *Automatización Programable*

La automatización programable permite cambiar la secuencia de operaciones para adaptarse a diferentes configuraciones de productos. La secuencia de operaciones está controlada por un programa que va reconfigurando los dispositivos cada vez que se termina un lote de productos y se inicia uno distinto, lo que lleva asociado una pérdida de tiempo considerable. Sus principales características son:

- Alta inversión en equipos de uso general.
- Menores tasas de producción respecto a la automatización fija.
- Adecuado para volúmenes de producción medios y bajos y sistemas de producción por lotes.
- Flexibilidad para hacer llevar a cabo variaciones y cambios en la configuración del producto.

▪ *Automatización Flexible*

La automatización flexible es una extensión de la automatización programable, en la que el sistema es capaz de pasar de un trabajo a otro sin tiempo perdido entre ellos. Se caracteriza por:

- Alta inversión en un sistema personalizado.
- Producción continua de productos diferentes.
- Apropia para volúmenes medios de producción.
- Flexibilidad para acomodar variaciones de productos similares.

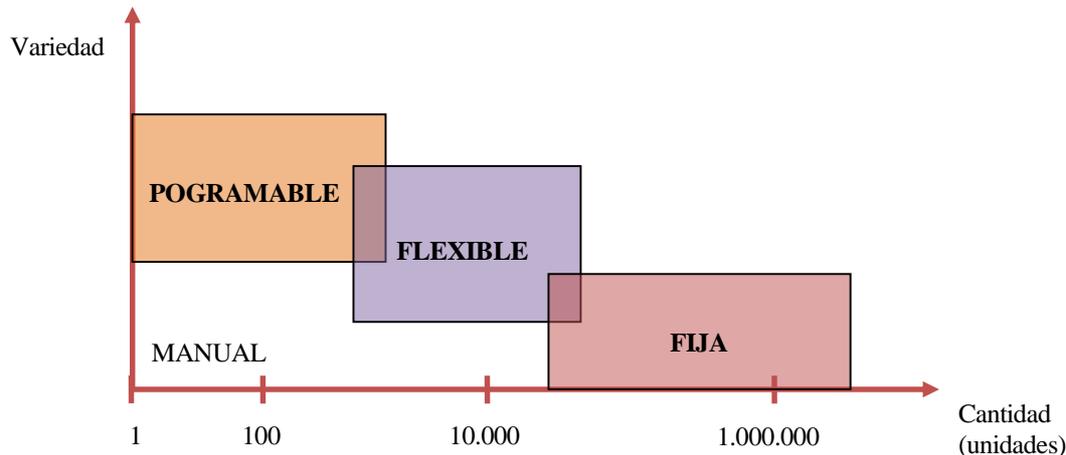


Figura 2.15. Tipos de automatización según variedad y cantidad de productos fabricados. Fuente [4].

En la fabricación celular, a menudo se emplean máquinas con automatización programable para el mecanizado de sus productos, lo que mejora los tiempos de fabricación y permite fabricar piezas de mayor complejidad. Estas máquinas son las llamadas *máquinas de control numérico*.

2.4.2. Control numérico

El Control Numérico (CN) es una forma de automatización programable en el que las acciones mecánicas y funciones de una máquina-herramienta o equipo están controlados por un programa de códigos alfanuméricos, también llamados comandos. Estos códigos indican las posiciones relativas entre el cabezal de trabajo y la pieza, y las condiciones de operación para la fabricación. Al acabar un tipo de pieza se introduce un nuevo programa para fabricar otro tipo de pieza distinta.

Tradicionalmente las máquinas-herramientas realizaban tareas sencillas, tales como taladrar, fresar o torneear, mientras el operario encargado de la supervisión de dichas tareas regulaba las variables de mecanizado: velocidad, profundidad, tiempo, etc. Ahora, son con las máquinas de CN las que realizan todo tipo de operaciones de mecanizado al mismo tiempo que controlan las variables de dichas operaciones, sin la necesidad de que intervenga un operario.

Las primeras máquinas de CN se programaban con cintas perforadas de papel donde la disposición de los distintos agujeros correspondía a diferentes instrucciones. Un controlador leía e interpretaba el programa y lo traducía en secuencias de operaciones que debía realizar la máquina. Con el paso del tiempo se sustituyó el codificador y decodificador de cintas por un microprocesador, la *Unidad de Control de la Máquina (MCU)*, debido a la poca flexibilidad para modificar programas que proporcionaban las cintas perforadas. De esta forma, los componentes básicos del control numérico son:

- Un programa de instrucciones para el mecanizado de la pieza.
- Una MCU que controla los movimientos y funciones de la máquina.
- Un equipo de mecanizado o máquina-herramienta que realiza el procesado de la pieza.

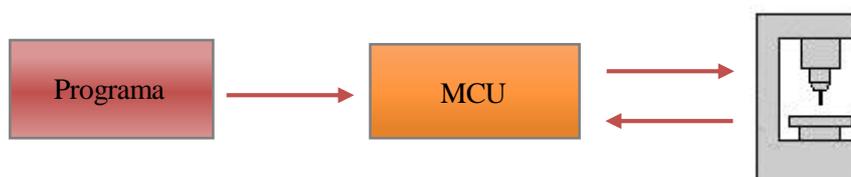


Figura 2.16. Estructura del CN. Fuente [4].

Las máquinas de CN emplean un sistema de coordenadas cartesianas, en el que se definen seis movimientos de la herramienta: tres traslaciones según los ejes x - y - z y tres rotaciones, a - b - c , alrededor de dichos ejes. Cada máquina posee un interpolador mediante el cual se coordinan los movimientos de dos o más ejes. Esta interpolación puede ser lineal, circular, helicoidal, parabólica o cúbica y dependerá de la geometría de las piezas a mecanizar.

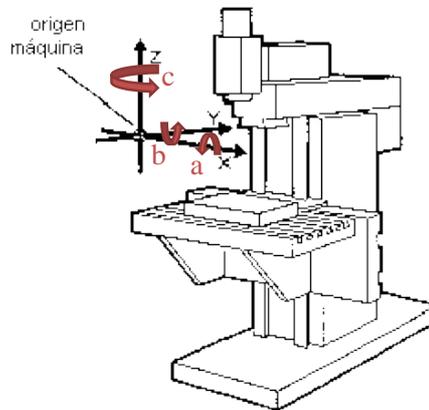


Figura 2. 17. Ejes de una máquina CN. Fuente: www.virtual.unal.edu.co.

Por otra parte, cada máquina posee un número determinado de ejes, esto es, número de traslaciones o rotaciones en los ejes coordenados en los que se puede mecanizar. Así, por ejemplo, una máquina de un eje, sólo puede mecanizar mediante movimientos paralelos a un eje, mientras que una máquina con 4 ejes puede trasladar la herramienta por trayectorias 3D así como realizar operaciones mediante rotación a uno de los ejes. Del mismo modo, se pueden tener 2 ejes y medio, 3 ejes y medio, etc. Se denominan máquinas de medio eje, aquellas en las que un eje puede posicionar pero no se puede mecanizar en él.

El control numérico aporta numerosas ventajas respecto a las máquinas-herramientas no automatizadas:

- Mayor precisión y repetitividad.
- Reducción de tiempos de entrega.
- Reduce los requisitos de inspección.
- Simplificación del utillaje de sujeción.
- Menores tasas de desechos, menos errores.
- Mayor complejidad en la geometría de las piezas.
- Cambios de ingeniería más fácilmente de implementar.
- Reducción del tiempo no productivo: preparación de la máquina, sujeción y colocación de las piezas.

Sin embargo, las máquinas de control numérico también presentan ciertas desventajas:

- Mayor coste de inversión inicial.
- Mayor coste de mantenimiento.
- Necesidad de programar códigos para la fabricación de piezas, mediante programadores expertos y cualificados.

Con el desarrollo de la tecnología, la programación y la microelectrónica, los controladores numéricos se hicieron más complejos y sofisticados, potenciando las funciones que permitían desarrollar y simplificando los métodos de programación. Es así como surgió el Control Numérico Computerizado (CNC). El CNC consta de una microcomputadora encargada del control de los movimientos, los cálculos de interpolación y la gestión de entrada y salida de datos. La MCU de las máquinas CNC posee una arquitectura interna más compleja compuesta por:

- Memoria RAM y memoria ROM.
- Una Unidad Central de Procesos (CPU).
- Un interfaz de entrada y salida de datos.
- Controles de velocidad y posicionamiento de herramientas.
- Controles de cambio de herramientas, sujeción de piezas o empleo de refrigerante durante la fabricación.

Las máquinas CNC permiten diversas formas de entrada de instrucciones de fabricación, así como la edición y el almacenamiento de más de un programa de piezas. Se consiguen funciones de interpolación más difíciles y se pueden ajustar automáticamente la velocidad de la herramienta, los cambios de dirección y el cese de mecanización. Asimismo se pueden diagnosticar incidentes y controlar la vida útil de las herramientas.

Cuando se tiene un elevado número de máquinas de CNC es conveniente tener un control de las mismas a través de un único ordenador central con conexión directa y en tiempo real a las MCUs de cada máquina. Es lo que se conoce como *Control Numérico Distribuido (DNC)*. Las MCUs, que son de CNC, reciben grupos de programas del ordenador central y los almacenan en sus memorias. Estos programas son transmitidos a las máquinas-herramienta cuando se precisan y se almacenan datos sobre el desarrollo de la producción que son enviados mediante las MCUs al ordenador central.

2.4.3. Introducción a la programación de piezas de CN

La programación de una máquina herramienta de CN consiste en elaborar, codificar y verificar la información necesaria para mecanizar una pieza en un lenguaje comprensible por dicha máquina. Es un proceso que consta de tres etapas: preparación del trabajo, codificación del programa y prueba y puesta a punto.

▪ *PREPARACIÓN DEL TRABAJO.*

Antes de comenzar con la codificación del programa se debe conocer y establecer el proceso de fabricación, identificando el número de operaciones, cambios de útiles y herramientas, materiales necesarios, así como el trabajo realizado por la máquina que se desea programar. La preparación del trabajo se lleva a cabo mediante la siguiente secuencia:

- **Estudio de la pieza a fabricar:** material, dimensiones, cotas, tolerancias, acabados superficiales, etc.
- **Análisis de las operaciones elementales.** Las superficies a mecanizar se descomponen en los diferentes tramos que la herramienta puede seguir según los ejes que tenga.
- **Selección de herramientas.** Se eligen la más adecuadas para cada operación, en función de las tolerancias y los acabados superficiales.
- **Diseño de utillajes.** Se busca la correcta sujeción de la pieza sobre la máquina, procurando dejar la mayor superficie libre para poder mecanizar. Los utillajes se diseñan para que el cambio de posición de la pieza sea lo más rápido posible.
- **Definición de las condiciones técnicas de mecanizado.** Para el mecanizado se deben definir la velocidad de avance y la profundidad de pasada, procurando obtener tiempos de fabricación lo más cortos posible.
- **Secuenciación de las operaciones de mecanizado.** Para establecer el orden de operaciones durante el mecanizado se puede hacer uso de un dibujo donde se plasman las distintas fases, cada una con la zona a mecanizar, las herramientas empleadas y las fijaciones necesarias.

Una vez definido el proceso se procede a la codificación de las instrucciones de mecanización de la pieza, lo que se conoce normalmente como programación de control numérico.

▪ *CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA.*

Con la codificación del programa se consigue transcribir las órdenes de fabricación mediante el uso de símbolos y letras a un lenguaje entendible por la máquina. El lenguaje de programación empleado debe estar disponible en un manual para los operarios que trabajan con dichas máquinas.

La programación de las operaciones para la fabricación de las piezas puede realizarse mediante tres formas distintas: programación manual mediante normalización ISO, programación automática y programación asistida por ordenador usando sistemas CAD/CAM.

○ Programación Manual

Este tipo de codificación se realiza sin soporte informático. La información se descompone en operaciones elementales que se dividen en bloques o fases del programa y constituyen una línea horizontal del código. Las “palabras” o funciones de cada bloque están dispuestas en un orden determinado al que se denomina *formato de bloque* y cada formato comienza con un número de línea (caracterizado por N y un número). Según la norma ISO, se distinguen las siguientes funciones:

- N: número de bloque.
- G: función preparatoria.
- X Y Z: desplazamiento en las direcciones principales.
- U V W: desplazamiento en direcciones secundarias.
- I J K: coordenadas de centros de círculos
- A B C: giros en los ejes principales.
- F: velocidad de avance.
- S: velocidad de giro.
- T: selección de herramienta.
- M: comandos misceláneos.

○ Programación Automática.

La programación automática surge para evitar los errores humanos en trabajos de gran complejidad que se producían en la programación manual, además de aumentar la precisión en las operaciones y agilizar el tiempo de codificación. El lenguaje más importante es el ATP (Automatically Programmed Tooling). En él los comandos son palabras inglesas que designan operaciones elementales o geometrías simples, mejorando así la definición y seguimiento del programa.

La codificación se lleva a cabo en dos etapas: el procesado y el post-proceso. En primer lugar, el procesado define la geometría, el camino de la herramienta y las condiciones de trabajo, generando un fichero de salida conocido como CLDATA (Cutter Location Data). En segundo lugar, el programa de post-proceso codifica toda la información del CLDATA en el lenguaje de control numérico correspondiente. Este programa de post-proceso es elaborado por los usuarios o fabricantes.

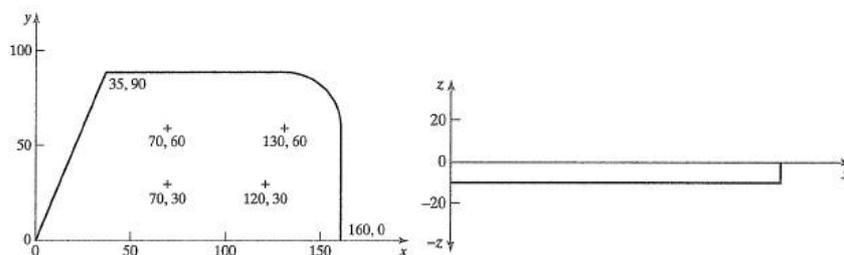


Figura 2. 18. Ejemplo de pieza a mecanizar mediante CN. Fuente [4].

| Código de Control Numérico | Descripción |
|-------------------------------------|---|
| N001 G21 G90 G92 X0 Y-050.0 Z010.0 | Se define el origen de los ejes. |
| N002 G00 X070.0 Y030.0 | Movimiento rápido a la primera posición |
| N003 G01 G95 Z-15.0 F0.05 S1000 M03 | Taladrar el primer agujero |
| N004 G01 Z010.0 | Separar la herramienta del agujero |
| N005 G00 Y060.0 | Movimiento rápido a la segunda posición |
| N006 G01 G95 Z-15.0 F0.05 | Taladrar el segundo agujero |
| N007 G01 Z010.0 | Separar la herramienta del agujero |
| N008 G00 X120.0 Y030.0 | Movimiento rápido a la tercera posición |
| N009 G01 G95 Z-15.0 F0.05 | Taladrar el tercer agujero |
| N010 G01 Z10.0 | Separar la herramienta del agujero |
| N011 G00 X0 Y-050.0 M05 | Movimiento rápido al punto de destino |
| N012 M30 | Final del programa, parar máquina |

Tabla 2. 11. Programación manual para realizar taladros mediante código ISO de la Figura 2. 18. Fuente [4].

| Código de Control Numérico | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| MACHIN/DRILL, 01 | SPINDL/1000, CLW | RAPID |
| CLPRNT | FEDRAT/0.05, IPR | GOTO/P7 |
| UNITS/MM | GODLDATA/0, 0, -25 | SPINDL/1000, CLW |
| PTARG=POINT/0, -50.0, 10.0 | GODLDATA/0, 0, 25 | FEDRAT/0.05, IPR |
| P5=POINT/70.0, 30.0, 10.0 | RAPID | GODLDATA/0, 0, -25 |
| P6=POINT/120.0, 30.0, 10.0 | GOTO/P6 | GODLDATA/0, 0, 25 |
| P7=POINT/70.0, 60.0, 10.0 | SPINDL/1000, CLW | RAPID |
| FROM/PTRAG | FEDRAT/0.05, IPR | GOTO/PTARG |
| RAPID | GODLDATA/0, 0, -25 | SPINDL/OFF |
| GOTO/P5 | GODLDATA/0, 0, 25 | FINI |

Tabla 2. 12. Programación automática para realizar taladros mediante código ISO de la Figura 2. 18. De arriba abajo y de izquierda a derecha. Fuente [4].

○ Programación Asistida por Ordenador

Este tipo de codificación hace uso de sistemas interactivos que permiten realizar y simular operaciones de diseño y fabricación asistidos por ordenador. Estos sistemas recogen distintas disciplinas cuyas siglas empiezan por CA (Computer Assisted) de forma invariable. Las tres disciplinas más usadas son:

- **CAD** (Computer Assisted Design). Con el *Diseño Asistido por Ordenador* se pueden realizar, mejorar, modificar y ampliar los diseños en tres dimensiones de los productos a fabricar. Los dibujos pueden visualizarse y acotarse en la pantalla en diferentes “vistas” con gran precisión.
- **CAM** (Computer Assisted Manufacturing). La *Producción Asistida por Ordenador* permite el estudio y control de los procesos de fabricación y manufactura, así como la manipulación y transporte de los materiales.
- **CAE** (Computer Assisted Engineering). La *Ingeniería Asistida por Ordenador* se aplica a todo el desarrollo de productos utilizando simuladores de comportamiento, sin necesidad de diseñar prototipos. Se emplea para valorar diferentes características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su objetivo es minimizar los costes de fabricación y reducir las pruebas de obtención del producto deseado.

El CAD y el CAM suelen combinarse resultando el CAD/CAM, que permite integrar los cambios de productos con los cambios en sus procesos de obtención. Esto reduce las confusiones y errores originados por el paso de la fase de diseño a la de fabricación.

Más allá de la asistencia por ordenador se sitúa la *Fabricación Integrada por Ordenador* (CIM, Computer Integrated Manufacturing) que persigue la automatización, integración y comunicación de un conjunto más amplio de actividades, incluyendo departamentos no pertenecientes a la producción, como el comercial, el financiero o el organizacional.

Todas estas disciplinas permiten reducir tiempos y costes asociados al diseño, la modelización y la fabricación de los productos y de los procesos.

▪ PRUEBA Y PUESTA A PUNTO

En esta última etapa de la programación se comprueba que la máquina ejecuta adecuadamente las operaciones codificadas sobre la pieza y se obtiene con los requisitos deseados. Si la codificación se ha realizado mediante asistencia por ordenador puede realizarse una simulación para verificar que el procedimiento de obtención sea el adecuado. Si los medios empleados no permiten realizar esta simulación es aconsejable efectuar la primera prueba sobre un material blando para evitar daños en la máquina si se produjese algún error. Una vez el programa proporcione la pieza tal y como se ha diseñado finaliza el proceso de programación.

2.5. Fabricación Flexible

Ya en la década de 1980 empezó a notarse un cambio en las políticas de las empresas y en los sistemas de producción industrial. Todo ello como consecuencia de la situación del mercado, caracterizado por una menor tasa de crecimiento, una mayor exigencia de la calidad, la introducción de nuevas y sofisticadas tecnologías y la competencia a nivel mundial. Las fábricas convencionales ofrecían productos estándares en masa, lo que conllevaba un exceso de la capacidad productiva y la imposibilidad de satisfacer los requerimientos personales de los clientes a unos costes razonables.

Ante esta nueva exigencia de mercado y la necesidad de obtener beneficios mediante un sistema rentable de producción, la política de las empresas se basa en los siguientes aspectos:

- Flexibilidad del producto y de los procesos de fabricación, mediante la automatización de dichos procesos y la reducción de tiempos de programación.
- Calidad y fiabilidad del producto. Las inspecciones de calidad y controles predictivos pasan a formar parte de cada operación en el puesto de trabajo.
- Integración de los procesos mediante ingeniería concurrente.
- Reducción de tiempos de respuesta para el lanzamiento de nuevos productos, mediante programación asistida por ordenador CAD/CAM.
- Eliminación del gasto innecesario.
- Reducción de tiempos de preparación y de espera.
- Automatización de los procesos.
- Aumento de la productividad.

Todos estos aspectos conducen al empleo de un sistema de fabricación que reduce el coste unitario de producción al mismo tiempo que eleva la productividad de la planta: la *fabricación flexible*. La fabricación flexible se caracteriza por: la **flexibilidad** en productos, en cuanto a diversidad de diseños, y en la producción, en cuanto a lotes y cantidades de fabricación; la **automatización** en mecanizado, transporte de material, cambio de herramientas, verificación o limpieza de piezas; una elevada **productividad** debido a la disminución de tiempos de cambio de herramientas y a la optimización del mecanizado; el aumento de la **calidad** del producto por la precisión de las máquinas de CN y la inspección de piezas; y la **fiabilidad** de los procesos gracias al control preventivo y a los controles de desgaste y averías.

2.5.1. Sistemas de Fabricación Flexible

Un *Sistema de Fabricación Flexible* (Flexible Manufacturing System, FMS) es un grupo de máquinas-herramienta de control numérico enlazadas entre sí mediante un sistema de transportes y manejo de materiales común y un sistema de control centralizado. La estación central de datos contiene y suministra a las distintas máquinas de CN los programas de las piezas de una familia que se mecanizan de forma automática.

En la fabricación flexible no siempre será necesario emplear un FMS para llevar a cabo la producción. De hecho, el empleo de un FMS sólo resulta conveniente para unas condiciones de producción determinadas. Si se desea producir lotes de piezas similares y de tamaño mediano o grande, se emplean máquinas-herramienta de CN no encadenadas por almacenes intermedios, pero cuyo flujo de trabajo se realiza en serie. Si, por el contrario, se producen lotes medianos de piezas diferentes lo más adecuado son los *centros de mecanizado*³ trabajando de forma paralela. Finalmente, si se requiere la producción de varias piezas distintas en lotes pequeños se necesita un sistema de fabricación flexible.

Un FMS consta de cinco subsistemas o grupos de elementos conectados entre sí para la fabricación automática: máquinas-herramienta de CN, un dispositivo de cambio de herramientas, un sistema de transporte de materiales, un área de almacenaje con proceso de carga y descarga automática y un sistema central de control. En ocasiones las máquinas-herramienta incluyen la función de cambio automático de piezas y herramientas. Todos ellos contienen los elementos que conforman el sistema de fabricación flexible y que pueden clasificarse en elementos físicos, elementos de control y mano de obra. Los principales *elementos físicos* son:

³ Máquina de CNC altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado a gran velocidad con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio.

- **Piezas**

En una fábrica flexible los productos se agrupan por familias atendiendo al proceso de fabricación preferiblemente. Para ello se emplean los conceptos de la tecnología de grupos y se codifican para facilitar el almacenaje y su posterior localización. Finalmente las máquinas se agrupan para fabricar dichas piezas.

- **Sistema de identificación de materiales y piezas**

Es importante contar con un sistema que permita localizar e identificar rápidamente los distintos productos dentro del proceso productivo, para así reducir el tiempo de manipulación de los mismos. Para ello se emplean sistemas ópticos y magnéticos. Los primeros suelen ser códigos de barras, identificadores de caracteres y reconocedores de formas; los segundos, tarjetas y cintas magnéticas.

- **Herramientas**

Debido a la gran cantidad de herramientas necesarias para la mecanización de las piezas de una familia y a la diversidad de tipos de acoplamientos a las máquinas, las herramientas se diseñan por módulos. Cada herramienta modular contiene un acoplamiento, un adaptador y la propia herramienta. El objetivo es la adopción de sistemas modulares universales en los que el acoplamiento esté siempre montado en el portaherramientas de la máquina y la herramienta pueda fijarse a éste con o sin adaptador, para así conseguir que una herramienta pueda utilizarse en distintas máquinas.

- **Sistema de identificación de herramientas**

Los sistemas de identificación de herramientas suelen emplear códigos de barras, cápsulas de código fijo y cápsulas de código programable. Las cápsulas de código fijo contienen un número prefijado que la máquina debe reconocer mediante una unidad de lectura. Las de código programable, son capaces de almacenar una cantidad de información mayor: número identificativo de la herramienta, tiempo acumulado de mecanización, etc.

- **Estaciones para el prerreglaje de herramientas**

Estas estaciones se encuentran generalmente fuera del área de mecanización y son específicas para determinar y medir los correctores de las herramientas. Pueden ser de CNC para así enviar la información correspondiente al ordenador central y mantener un control del estado de las herramientas.

- **Sistema de desgaste de herramientas**

El desgaste de las herramientas puede medirse por cálculo teórico o por medición del desgaste directa o indirectamente. La medición directa puede realizarse midiendo la distancia entre la arista de la herramienta y la pieza, midiendo la superficie de desgaste con reflexión de un rayo láser o mediante la comparación del perfil sin desgaste con la imagen actual de la herramienta. La medición indirecta se lleva a cabo evaluando las condiciones de trabajo y las consecuencias del uso de las herramientas: consumo de los motores, esfuerzos de corte de la herramienta y evolución de las cotas en piezas mecanizadas, entre otros.

- **Utillajes**

En un FMS es importante la reducción de tiempos de fabricación asociados al cambio, montaje y fijación de piezas sobre las máquinas. Para dotar de flexibilidad al proceso de fijación de piezas se hace uso de palets que se acoplan en las máquinas y sobre los que se sitúan las piezas. El montaje de piezas en palets se lleva a cabo fuera de la estación de mecanizado, realizándose manualmente o automáticamente.

- **Almacenes**

En la fabricación flexible se busca la eliminación de stock, que aumenta la posibilidad de obsolescencia de productos y eleva el coste de mantenimiento de almacenes. La tendencia es eliminar los almacenes grandes y colocar a pie de máquina las herramientas y las piezas.

- **Máquinas**

Las máquinas de un FMS están caracterizadas por la flexibilidad de funciones y operaciones. Ninguna máquina debe estar orientada a la fabricación de una pieza determinada; cada máquina debe poder utilizarse de forma universal una vez cambiadas las herramientas e incorporado el nuevo programa. El empleo de máquinas de CN automatizadas permite: el mecanizado parcial o total de piezas sin necesidad de intervención humana, el cambio automático de piezas, la carga y descarga de piezas, etc. Además de estas

funciones pueden contener otros sistemas automáticos, como sistemas de refrigeración y lubricación, evacuación de viruta y limpieza de piezas y de la propia máquina. Las máquinas que incorporan estas funciones automáticas auxiliares son los centros de mecanizado.

- **Sistema de medición de coordenadas tridimensionales**

Las máquinas de medición de coordenadas son máquinas de CNC en las que una vez generado el programa de control numérico para medir una pieza, las siguientes piezas del mismo tipo se miden de forma automática. Toda la información pasa al ordenador central donde se mantiene un seguimiento de las medidas, cotas y tolerancias de las piezas, permitiendo la rápida corrección de mecanizados incorrectos por herramientas desgastadas.

- **Sistema de detección de posición y velocidad**

Las máquinas de CN disponen de captadores de posición para determinar con precisión y de forma automática la posición de la herramienta respecto a la pieza. Estos captadores pueden ser analógicos o digitales, dependiendo de la señal que suministra; absolutos o incrementales, dependiendo si las señales están relacionadas de manera unívoca con las posiciones independientemente de las medidas anteriores o si su campo de medida está dividido en un número entero o en incrementos de longitud; directos o indirectos, dependiendo de si captan directamente la posición del elemento a medir o si captan la posición de otro elemento relacionado con el que se desea medir; lineales o rotativos, dependiendo de si en la parte fija y la móvil del captador hay un desplazamiento lineal o angular.

Estas máquinas también pueden disponer de captadores de velocidad. El más conocido es la dinamo tacométrica, sensor que permite conocer la velocidad mediante la emisión de una señal eléctrica proporcional a la misma.

- **Sensores de temperatura**

Gracias a estos sensores se puede tener un control de la temperatura de las herramientas y de la máquina y pueden detectarse desviaciones y aumentos de temperatura inesperados en el proceso de mecanizado.

- **Robots industriales**

Un robot es un manipulador mecánico y multifuncional controlado por ordenador para desplazar materiales, piezas, herramientas u otros elementos mediante movimientos programados para la ejecución de diversas tareas. Entre las operaciones que desempeñan se encuentran las operaciones de procesado como soldadura, pintura, montaje e inspección, las tareas repetitivas y aquellas que resulten peligrosas para el ser humano. Los robots industriales generalmente tiene una estructura antropomórfica y se componen de dos partes: un cuerpo-brazo articulado, para el posicionamiento de objetos, y una muñeca, para orientar el elemento terminal (herramienta u objeto de trabajo). Los robots poseen además sistemas de control y programación de órdenes así como de múltiples sensores para llevar a cabo las operaciones. Pueden disponerse en la planta de fabricación de cuatro formas principales: *en el centro de la célula*, donde el robot sirve a una o varias máquinas en tareas de carga y descarga o paletizado; *en línea*, donde las piezas sobre las que tienen que trabajar se desplazan sobre un sistema de transporte mientras los robots se encuentran fijos; *en configuración móvil*, donde los robots se colocan sobre un sistema de transporte, normalmente un eje lineal, sobre el que se desplaza y que permite seguir el movimiento de piezas que se desplazan sobre un sistema de transporte continuo; *en suspensión*, donde los robots se colocan suspendidos en el techo o en la pared sobre la zona de trabajo, logrando un mejor aprovechamiento del área de trabajo.

- **Sistema de transporte**

Los sistemas de transporte garantizan el movimiento de piezas entre las máquinas, estaciones de trabajo y almacenes. En un FMS se pretende reducir al máximo el tiempo de manipulación de materiales; se estima que el 95 % del tiempo disponible para fabricar, el producto se encuentra inactivo en operaciones de transporte y esperas para ser procesado. En costes, supone en torno al 25% del coste total de fabricación.

Existen muchos sistemas de transporte y manipulación de materiales: transportadores de cintas, rodillos y cadenas, carretillas manuales y motorizadas, monorraíles y vehículos sobre raíles, y vehículos guiados automáticamente (AGV, Automatic Guided Vehicles). Un FMS busca la flexibilidad y automatización del sistema de transporte y manipulación de materiales, lo que se consigue con el empleo de sistemas de manipulación de material automatizado y sistemas de AGVs. Éstos últimos emplean vehículos autopropulsados independientes y guiados a lo largo de caminos definidos en la fábrica. En cuanto a las

tecnologías de guiado se distinguen tres: cables subterráneos, tiras o caminos pintados y vehículos autodirigidos mediante un software específico. El ordenador es quien controla el transporte y elige la ruta.

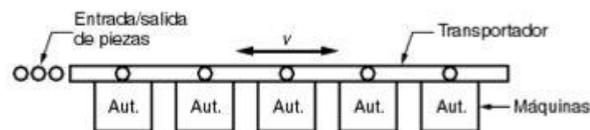
El principal *elemento de control* es el **software** del FMS que controla todas las funciones que ejecuta el sistema de fabricación: programación de piezas por CN, control de la producción, copia de programas por CN, control de la máquina y la pieza de trabajo, administración de herramientas y control del transporte, entre otros. Está formado por módulos que se asocian a dichas funciones.

La *mano de obra humana* constituye el elemento adicional en la operación de un sistema flexible, pero es, al mismo tiempo, el componente esencial para su implantación y mantenimiento. Un FMS se caracteriza por su automatización, autonomía y flexibilidad, sin embargo hay ciertas actividades que sólo el ser humano puede realizar. Entre las actividades que realizan los operarios se encuentran el cambio y preparación de las herramientas de corte, el mantenimiento y reparación del equipo, la programación de piezas de control numérico y la administración general del sistema.

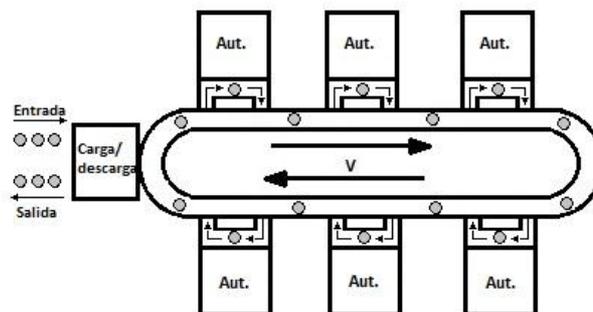
Por tanto, el trabajo automático de los elementos físicos se coordina haciendo uso de un conjunto de dispositivos electrónicos unidos entre sí mediante una red de comunicaciones y una serie de programas de las distintas secuencias de operaciones a realizar, controlados por el software del sistema y mantenidos por la mano de obra. La automatización y la flexibilidad de operaciones de mecanizado y el intercambio rápido de piezas y herramientas hacen de los sistemas de fabricación flexible la mejor elección para producir eficientemente un volumen reducido de una amplia variedad de piezas.

Por otro lado, el sistema de manipulación y transporte de material establece y determina el tipo de layout de un FMS. Los principales tipos de layout actuales son:

- El **layout en línea** emplea un sistema de transferencia de piezas lineal que puede operar en las dos direcciones. Mueve las piezas entre las distintas máquinas ayudando a los procesos de carga y descarga.
- El **layout en bucle** consiste en un transportador en ciclo con las máquinas o estaciones de trabajo ubicados a su alrededor. Permite el acceso a cualquier operación de forma rápida.
- El **layout en escalera** cuenta con un transportador en ciclo con peldaños entre unas secciones horizontales donde se colocan las máquinas. Este sistema requiere un segundo sistema de manipulación que permite llegar de una máquina a otra y disminuye la congestión del sistema de transporte.
- El **layout a campo abierto** es la configuración más compleja y consiste en varios sistemas de bucles y escaleras. Esta distribución es apropiada para la producción de grandes familias de piezas.
- El **layout centrado en robots** emplea uno o varios robots como sistema de manipulación de piezas que se encarga de suministrar y retirar las piezas de las máquinas. En la siguiente figura se muestran los diferentes tipos de layout comentados.



a)



b)

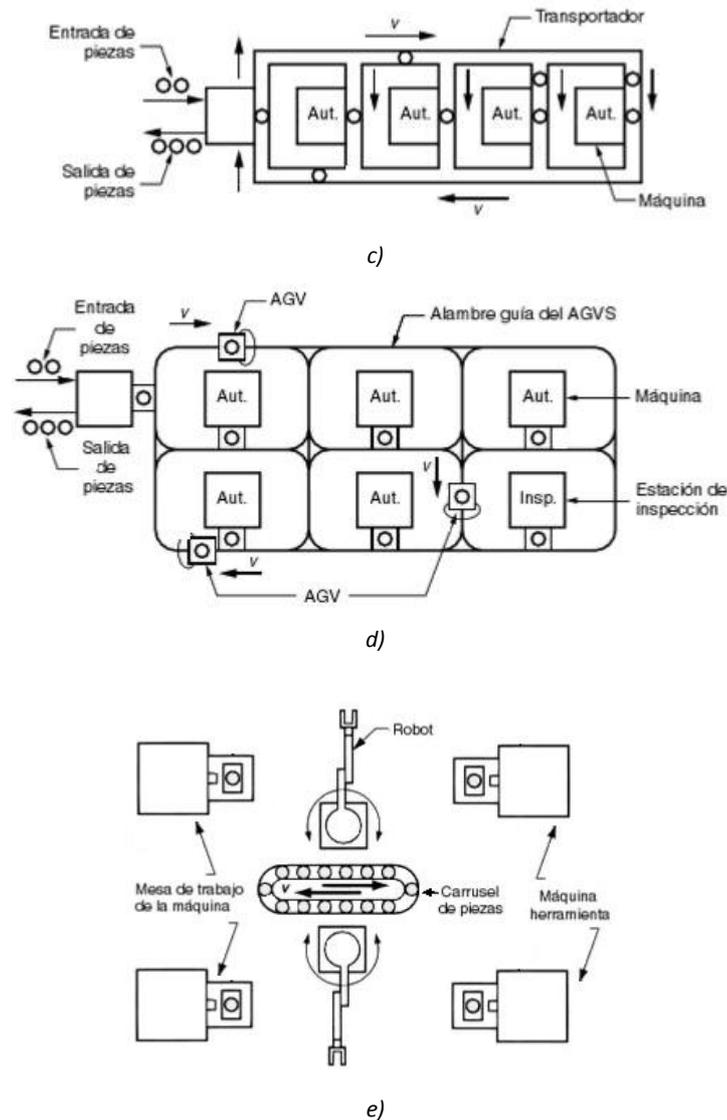


Figura 2. 19. Ejemplos de FMS: a) en línea, b) en bucle, c) en escalera, d) a campo abierto, e) centrado en robots. Fuente [2].

Los sistemas de fabricación flexible pueden variar en cuanto a número de máquinas y nivel de flexibilidad. Cuando el sistema sólo tiene algunas máquinas, se emplea el término *célula de fabricación flexible*.

2.5.2. Células de fabricación flexible

Una *Célula de Fabricación Flexible* (Flexible Manufacturing Cell, FMC) está formada por dos o tres máquinas autónomas de control numérico dotadas de dispositivos de cambio de herramientas y piezas y un ordenador central que coordina los elementos de mecanizado, mantenimiento y transporte. Por lo general, cuenta con almacenes a pie de máquina para garantizar su autonomía durante varias horas. Este tipo de célula aúna las características de la fabricación celular y de la fabricación flexible. De la primera, toma el diseño y características físicas de la célula, como los procesos de formación y el diseño de células, la distribución de equipos, el layout y la autonomía; mientras que de la segunda adopta los aspectos de flexibilidad, control numérico y automatización.

Aunque pueden existir muchas variantes, el tipo de layout más empleado en las células de fabricación flexible es la distribución en forma de U para minimizar desplazamientos y compartir procesos. La disposición de los equipos debe ser tal que permita el aprovisionamiento de materiales desde fuera hacia dentro de la célula. De esta forma se abastece cada puesto de trabajo y se evacúa el producto acabado sin necesidad de entrar en la célula.

El proceso en la célula es relativamente sencillo: el material va pasando por las distintas máquinas mediante *movimientos en secuencia* o *movimientos de paso* [subsección 2.3.1.3.] hasta completar el conjunto de operaciones para obtener el producto final, que es retirado por un operario externo a la célula. Los operarios de la célula realizan operaciones de supervisión; cambio de herramientas, si fuera necesario y si la máquina no lo incluyese dentro de sus funciones; carga y descarga de material; y mantenimiento. Para ello, los operarios deben ser totalmente polivalentes en los procesos de la célula para dotar al sistema de flexibilidad y capacidad de adaptación a cambios de la demanda.

En ocasiones resulta difícil diferenciar un FMS de una FMC, por lo que resulta conveniente establecer las principales diferencias entre ambos. La primera diferencia y quizás la más intuitiva es el número de máquinas. Como ya se ha comentado, si se disponen de cuatro o más máquinas se puede considerar que es un sistema de fabricación flexible, aunque no siempre. La segunda diferencia es que generalmente un FMS incluye estaciones de trabajo que no realizan el procesado de las piezas, sino que realizan operaciones de soporte a la producción. La última diferencia está asociada al ordenador central de control. En un FMS este sistema es más sofisticado e incluye funciones que no suelen estar en una FMC como diagnósticos de averías y control de vida de las herramientas. Por lo tanto, una agrupación de cinco máquinas, por ejemplo, que no incluyese más estaciones de trabajo que las necesarias para el mecanizado de los productos y cuyo sistema central de control no sea lo suficientemente complejo y sofisticado, puede considerarse una FMC.

Una célula de fabricación flexible resulta el sistema de fabricación idóneo para producir un volumen de producción bajo o medio con la variedad característica de una familia de piezas. Es un sistema capaz de hacer frente a las fluctuaciones de la demanda mediante la nivelación y el equilibrado de la línea de producción, que permite introducir más o menos mano de obra, según se necesite.

En la figura 2.20 se muestra una configuración en U de una célula de fabricación flexible que consta de varias máquinas-herramienta y de una estación de inspección y medición. En general, las células pueden ser atendidas por un solo operador; sin embargo, cuando hay más máquinas, como es el caso de célula de esta figura es necesario que al menos intervengan dos operarios.

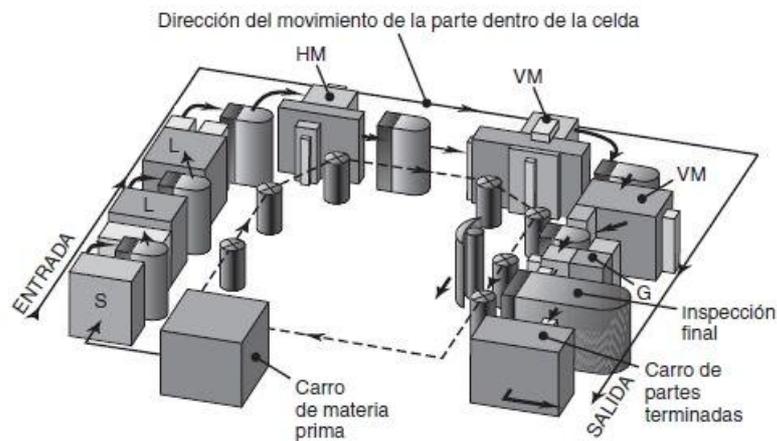


Figura 2. 20. Ejemplo de célula flexible de fabricación. S, sierra; L, torno; HM, fresadora horizontal; VM, fresadora vertical; G, rectificadora; x, posiciones de los trabajadores. Fuente [2].

2.5.3. Concepto de flexibilidad

Los sistemas y células de fabricación flexible son sistemas de producción altamente automatizados. Sin embargo algunos sistemas con un alto grado de automatización no son flexibles. Por ejemplo, una *línea de transferencia*⁴ es un sistema automatizado pero propio de la fabricación de piezas en masa, por lo que no es un sistema flexible.

⁴ Transportador de piezas y materiales que se mueve continuamente operando a velocidad constante.

En ocasiones se crea cierta confusión respecto a la *flexibilidad* de un sistema. Para calificar un sistema o célula como flexible debe cumplir una serie de criterios. Deben ser capaces de:

- Procesar diferentes estilos de piezas, pero no por el modelo de lotes.
- Responder de forma inmediata frente a errores y averías.
- Aceptar cambios en el programa de producción.
- Introducir nuevos diseños de piezas.

Por otra parte, el término flexibilidad está asociado a una amplia variedad de aspectos dentro de un sistema de fabricación:

- Flexibilidad en máquinas. Capacidad de adaptar una máquina a varios tipos de operaciones sin que la máquina sufra grandes cambios tras cada operación diferente.
- Flexibilidad en manipulación de material. Habilidad de mover eficientemente diferentes tipos de piezas y posicionarlas para su procesamiento.
- Flexibilidad en operaciones y procesos. Habilidad para llevar a cabo varias configuraciones de producción, cambiando la secuencia de operaciones.
- Flexibilidad de productos. Capacidad para producir diferentes tipos de piezas, añadir y eliminar modelos de productos.
- Flexibilidad de itinerarios y rutas. Capacidad de producir piezas alternando secuencias de operaciones y conjugando varias rutas a la vez.
- Flexibilidad de volumen. Habilidad de fabricar y operar rentablemente con volúmenes bajos y altos de productos.
- Flexibilidad de expansión. Facultad de aumentar el sistema de producción cuando sea necesario, en cuanto a instalaciones y mano de obra se refiere.
- Flexibilidad de programación. Capacidad del sistema de control de ejecutar programas de forma desatendida durante un largo periodo de tiempo.
- Flexibilidad de producción. Capacidad de producir un mayor número de piezas sin aumentar la inversión en nuevos equipos.
- Flexibilidad de mercado. Posibilidad de adaptación a las exigencias y cambios del mercado y la demanda.

Todos estos aspectos definen un sistema de fabricación eficiente con capacidad de adaptación y transformación ante diversas situaciones.

2.5.4. Beneficios de la fabricación flexible

La fabricación flexible aporta importantes y numerosas ventajas al sistema de producción completo. Con la implantación de sistemas y células de fabricación flexible se obtienen los siguientes beneficios:

- El incremento de la utilización de máquinas y equipos.
- La disminución del número de máquinas para hacer un mismo trabajo, debido al máximo aprovechamiento de las mismas.
- La reducción del espacio ocupado en la fábrica.
- La reducción de inventarios, ya que muchas piezas se fabrican al mismo tiempo en lugar de separadas por lotes.
- Una mayor capacidad de respuesta al cambio.
- La disminución del tiempo de entrega del producto final.
- La reducción de las necesidades de mano de obra directa y el aumento de la productividad.
- Una mayor capacidad de producción desatendida. El alto nivel de automatización permite fabricar durante largos períodos de tiempo sin supervisión humana.

Las células de fabricación y los sistemas de fabricación flexible son una de las técnicas de producción *Lean* que permiten fabricar una variedad de productos de manera rentable haciendo a la empresa más competitiva y reduciendo el tiempo de fabricación y los costes globales de producción. En el siguiente capítulo, se desarrolla este tipo de producción basado en la metodología Lean Manufacturing.

3 LEAN MANUFACTURING

Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo.

-Albert Einstein-

El término Lean Manufacturing se traduce al castellano como producción ajustada, aunque también es conocida en muchas publicaciones como producción o fabricación esbelta, ágil o delgada. Sin embargo, las empresas adoptan las palabras en inglés y japonés propias de la metodología Lean para referirse a su vocabulario técnico.

Lean Manufacturing es una filosofía de gestión empresarial enfocada a la reducción de los desperdicios, que se definen como aquellos procesos, prácticas o actividades que emplean más recursos de los estrictamente necesarios. Su objetivo es entregar al cliente el producto que desea, con la calidad exigida, cumpliendo los plazos de entrega y con la máxima reducción de costes para el cliente y la empresa. Se centra en la optimización del sistema de producción mediante mejoras continuas que involucran a todas las personas de la organización.

Su propósito final es la creación de una nueva filosofía de trabajo basada en la colaboración y el trabajo en equipo, una nueva cultura enfocada a la excelencia empresarial que evoluciona constantemente para optimizar lo ya establecido anteriormente.

3.1. Orígenes y antecedentes. Toyota Production System

A principios del siglo XX, surge la necesidad por parte del empresario de establecer técnicas para organizar la producción a partir de los estudios realizados por Frederick Winslow Taylor y Henry Ford sobre la producción en serie que ya se empleaba a finales del siglo XIX. Tanto Taylor como Ford buscaban la aplicación de un método a los distintos procesos que simplificase las tareas y redujese el tiempo de ejecución en los equipos.



*Figura 3. 1. Cadena de montaje del automóvil Ford T.
Fuente: www.blogs.laverdad.es*

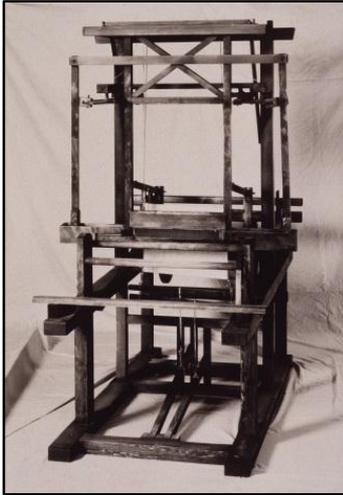


Figura 3. 2. Telar con detección automática de Sakichi Toyoda.
Fuente: www.toyotaprensa.es.

Sin embargo, es en Japón donde se abandona la producción rígida en masa y se comienza a desarrollar el pensamiento Lean. En 1902, Sakichi Toyoda, cofundador con su hijo Kiichiro de *Toyota Motor Company*, inventó un mecanismo que detenía un telar cuando el hilo se rompía, con lo que un único operario podía controlar varias máquinas a la vez. Más tarde, tras invertir en la industria automovilística y fundar Toyota, Sakichi y Kiichiro comenzaron a estudiar los métodos de producción de otras empresas americanas del mismo sector, como Ford, y pusieron especial atención en las técnicas de calidad de William E. Deming y Kaoru Ishikawa, entre otros.

De este modo, Toyota fue aplicando nuevas técnicas productivas. No obstante, a finales de 1949, a causa de un colapso en las ventas, el sobrino de Kiichiro, Eiji Toyota, y el considerado padre del Lean Manufacturing, Taiicho Ohno, se ven obligados a replantear sus métodos y tras visitar empresas automovilísticas



Figura 3. 3. Taiicho Ohno.
Fuente: www.lean.org.

americanas concluyen que lo que el cliente demandaba era producir automóviles pequeños y modelos variados a bajo coste y que para ello debían suprimir los stocks y todos los despilfarros.

A raíz de estas conclusiones y gracias a las aportaciones de Shigeo Shingo, ingeniero industrial de Toyota, se establecieron las bases del nuevo sistema de gestión conocido como *Toyota Production System* (TPS), basado en el “Just in Time” (JIT) y en el “Jidoka”, en el que se pretendía producir únicamente lo que el cliente demandaba y cuando lo solicitaba. Asimismo, se buscaba la reducción de tiempos mediante operaciones productivas en flujos continuos, evitando interrupciones.

El TPS pronto ganó importancia cuando muchas empresas japonesas perdieron ganancias a consecuencia de la crisis del petróleo de 1973. De este modo, el gobierno japonés fomentó el modelo de Toyota a otras empresas. Poco a poco esta filosofía de empresa se fue extendiendo a occidente, aunque no es hasta principios de 1990 cuando toma importancia a través del libro “*The Machine That Change The World*” de Womack, Jones y Roos, en el cual se comparaban los sistemas de producción de Japón, Europa y Estados Unidos y se hablaba por primera vez del término de Lean Manufacturing, describiéndolo como un sistema “capaz de combinar eficiencia flexibilidad y calidad” aplicable a cualquier empresa.

3.2. Estructura del sistema Lean Manufacturing. El Templo Lean.

El sistema Lean es un complejo de ideas, conocimientos y técnicas que requiere un cambio en la organización y metodología de la empresa. La “Casa del Sistema de Producción Toyota” o “Templo Lean” es un esquema usado de forma tradicional para visualizar la filosofía de este sistema. Como su nombre indica, tiene forma de casa o templo, donde los cimientos y los pilares constituyen la base de dicho sistema y sin los cuales la implantación Lean no resultaría efectiva. En la figura 3.4 se muestra una versión del “Templo Lean” adaptada a la estructura del contenido de esta sección.

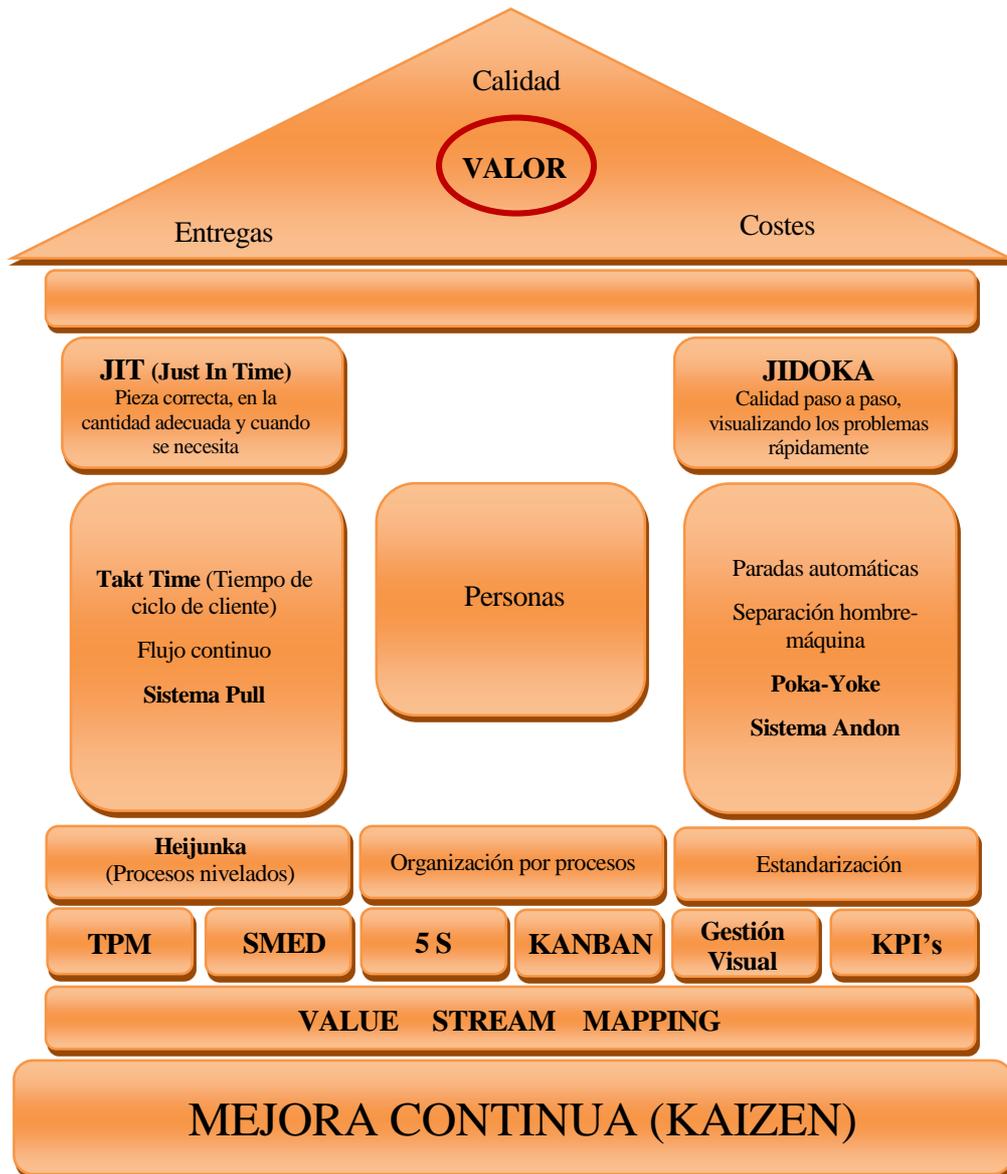


Figura 3. 4. Templo Lean. Fuente: Elaboración propia.

En este esquema se diferencian claramente tres zonas del “Templo”: los cimientos, los pilares y el techo.

- El techo es el triángulo *Calidad, Entregas y Coste*, que conforma el objetivo que debe perseguir toda empresa que busque el éxito.
- Los pilares, JIT y Jidoka, son el sustento y elemento de unión de dicho sistema.
- Los cimientos son la base consistente sobre la que se asientan los pilares y constituyen las herramientas y técnicas de implantación del sistema Lean en la empresa.

Hay una cuarta parte funcional que corresponde a la zona central del esquema: *las personas*. Ésta hace referencia tanto a los clientes como al personal cualificado de la empresa y es la parte fundamental para construir una organización basada en la filosofía Lean. Todo está enfocado hacia el cliente, hacia sus necesidades y exigencias, que es precisamente lo que la empresa desea satisfacer de la forma más rápida y eficiente posible. Y todo ello no sería posible sin la adecuada formación de los trabajadores ni sin su dedicación e involucración.

Para que el “Templo” sea consistente se han de conocer e implantar cada una de las herramientas y metodologías teniendo en cuenta las posibilidades y necesidades de la empresa. A continuación se detallan todas ellas.

3.2.1. El techo: el valor como objetivo

El objetivo del sistema Lean se representa en el “tejado” del templo: entregar un producto en el menor tiempo posible, con la máxima calidad y al menor coste. Estas características, calidad, coste y entrega a tiempo, hacen que el producto final tenga el valor por el que el cliente está dispuesto a pagar. Por tanto, es importante mantener dichos aspectos en todo el proceso productivo para conseguir la plena satisfacción del cliente.

3.2.2. Los pilares: JIT y Jidoka

El concepto *Just In Time* o *justo a tiempo* hace referencia a un sistema de gestión basado en la eliminación de desperdicios y en la llegada a tiempo de materias primas y productos para la fabricación o para al servicio al cliente. Está basado en el sistema Pull y en el concepto de Takt Time.

- El **sistema Pull** consiste en que cada proceso es el que retira del anterior las piezas necesarias, en la cantidad justa y en el instante que las necesita. De esta forma, el proceso anterior no produce hasta que el siguiente retira las piezas necesarias. Los productos fluyen de forma continua y regular.
- El **Takt Time** se emplea para sincronizar el ritmo de producción de una empresa para satisfacer el ritmo de demanda del cliente. Se calcula dividiendo el tiempo disponible para producir por la demanda del cliente en un periodo determinado:

$$Tack\ Time = \frac{Tiempo\ total\ disponible}{Demanda\ total\ del\ cliente}$$

De esta forma, con el sistema JIT se consigue que el cliente tire (Pull, en inglés) de la cadena de fabricación, produciendo únicamente lo que se necesita y cuando se necesita, adaptando el ritmo o compás (Takt, en alemán) de producción de los diferentes procesos de fabricación a los productos demandados por el cliente. Todo ello hace necesario que el flujo de materiales sea continuo a lo largo de la cadena de fabricación.

Por otra parte, el término japonés *Jidoka* o *autonomización* es la automatización con un “toque humano”. Consiste en la parada automática de máquinas ante la detección de un fallo o problema en un proceso u operación. De este modo, en cada proceso se obtienen productos de calidad con cero defectos, minimizando el número de piezas defectuosas a reparar. Para evitar que se cometan errores, Jidoka cuenta con sistemas antierrores y de alerta, como son las herramientas Poka-Yoke y Andon, respectivamente.

- La herramienta **Poka-Yoke** es un sistema a prueba de errores para eliminar o evitar equivocaciones, tanto en el ámbito humano como en el automático. Durante las múltiples operaciones de un proceso puede haber actividades muy repetitivas pudiéndose cometer errores fácilmente. Los sistemas Poka-Yoke se diseñan para prevenir el error o advertir de su corrección una vez producido dicho error. Los tipos más comunes de estos sistemas son:
 - Un diseño que sólo permita conectar las piezas de la forma correcta.
 - Un código de colores o formas que emparejen los dispositivos a conectar.
 - Flechas e indicadores del tipo “A → ← A”, “B → ← B” para indicar dónde va encajada la pieza y cuál es su orientación.

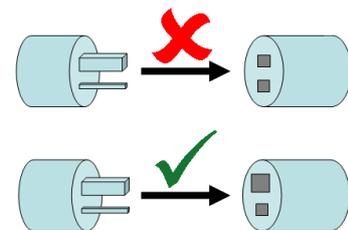


Figura 3. 5. Sistema Poka-Yoke.
Fuente: www.pdcahome.com.

- La herramienta **Andon** es un sistema de luces de diferentes colores situado en las estaciones de trabajo que informa a toda la organización de la existencia de una situación que se desvía del estándar y requiere una respuesta inmediata por parte del equipo correspondiente para la corrección de la anomalía. Este sistema puede ser de tres tipos:
 - **Simples con luz de un sólo color.** Las luces apagadas indican que el proceso se realiza correctamente. Si se enciende la luz de este sistema, el supervisor advierte una incidencia, pero no sabe qué tipo de problema es ni dónde ha ocurrido. El supervisor debe informarse del lugar de la incidencia y del proceso involucrado para resolverlo junto con el departamento afectado.

- **Con matriz de un sólo color.** Al encenderse la luz, el sistema indica el lugar y el tipo de problema que se ha producido. Una vez solucionado el problema, se apaga la luz.
- **Multicolor.** Este tipo de sistema es el más completo y más útil para advertir incidencias dentro de una planta de producción. Esta herramienta multicolor avisa al supervisor del lugar y tipo de incidencia, al mismo tiempo que informa al departamento afectado para su rápida intervención, mediante un color asignado a cada uno de ellos. El código de colores no está estandarizado, sino que es elección de cada empresa. Un ejemplo, puede ser:

- Luces apagadas: correcto funcionamiento del proceso.
- Blanco: llamado a operaciones.
- Amarillo: llamado a materiales.
- Naranja: llamado a cambio de útiles y herramientas.
- Rojo: llamado a mantenimiento.
- Verde: llamado a calidad.
- Azul: llamado a transporte de material.



Figura 3. 6. Sistema Andon multicolor.
Fuente: www.ab.rockwellautomation.com

Por otra parte, la ubicación de las luces de colores debe estar en un lugar muy visible desde cualquier punto de la planta para evitar demoras a la hora de emprender las acciones correctoras.

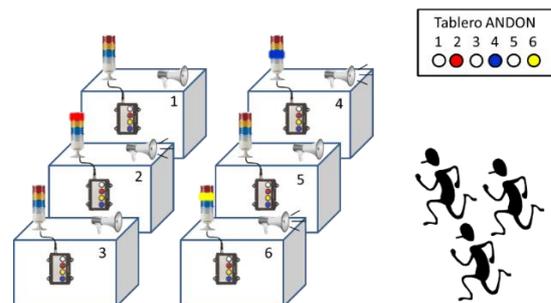


Figura 3. 7. Alerta de incidencias mediante Andon.
Fuente: www.andon2013.blogspot.com.es

Un sistema productivo que cuente con esta herramienta encuentra grandes beneficios en su utilización, ya que permite:

- Alertar al personal para realizar correcciones ante condiciones anormales.
- Ayudar a los supervisores a pasar menos tiempo y esfuerzo supervisando la situación y más tiempo solucionando problemas.
- Eliminar el hábito de la corrección tardía basándose en incidencias pasadas, los operadores pueden divulgar averías inmediatamente y las contramedidas se pueden poner en rápida ejecución con evidencias recientes.
- Responder rápidamente ante una situación anormal o incidencia, ya que cuanto antes se solucione el problema, menos costes se generarán en la empresa.

3.2.3. Los cimientos: herramientas y metodologías Lean

Para que el “Templo” sea consistente, éste ha de tener una base sólida sobre la que sustentarse, por lo que los métodos empleados deben conocerse y emplearse de la forma más adecuada.

3.2.3.1. Heijunka

Heijunka es una técnica que sirve para planificar y nivelar la demanda de clientes en volumen y variedad durante un período de tiempo. Con la nivelación (Heijunka, en japonés) de la producción se compensan las variaciones en la demanda mediante variaciones en las combinaciones de productos a fabricar, de modo que la carga de producción permanezca más o menos constante. Esto se consigue produciendo lotes pequeños de muchos modelos en períodos cortos de tiempo, manteniendo un flujo continuo de material, realizando cambios rápidos de herramientas para minimizar el tiempo de fabricación y fabricando de acuerdo a la demanda del cliente. Todo ello está íntimamente relacionado con el sistema JIT y, como puede observarse en el esquema del “Templo Lean”, la nivelación de procesos se ha situado en la base del pilar JIT.

3.2.3.2. Organización por procesos

La gestión por procesos busca identificar los procesos que añaden valor y eliminar o cambiar aquellos que no lo hagan, ya que suponen costes adicionales. Para ello se debe **establecer la estructura** de los procesos, identificándolos y seleccionando aquellos que afectan al grado de satisfacción del cliente y los que afectan a la consecución de los objetivos para luego agruparlos por departamentos y obtener un mapa de procesos; **caracterizar** los procesos mediante diagramas de flujo y fichas de procesos para obtener las descripciones e interrelaciones de las tareas de cada proceso; **comparar los resultados** con los esperados haciendo uso de indicadores; y **mejorar y optimizar** cada uno de ellos a partir de los resultados obtenidos.

3.2.3.3. Estandarización

El establecimiento de estándares es uno de los cimientos más importantes del “Templo Lean”. Es la base metódica sobre qué se debe hacer ante una acción o actividad que se desvíe de una situación normal. Los estándares se deben mantener y mejorar para que el trabajo resulte más fácil y seguro de realizar. También es una buena manera de identificar errores y darles rápida solución. Para establecer un estándar se deben aplicar los siguientes pasos:

- Observar los métodos actuales y estudiar la forma de estandarizarlos.
- Describir de forma simple, clara y concisa los nuevos métodos estandarizados.
- Formar y capacitar al personal para llevar a cabo los nuevos métodos de producción.
- Realizar un seguimiento continuo para garantizar el cumplimiento de los estándares.
- Revisar los estándares continuamente para actualizarlos y mejorar los métodos de producción.

Es conveniente conocer las limitaciones de la empresa para llevar a cabo la estandarización de la manera más adecuada a las necesidades de ésta. Si la empresa es pequeña no se debe pretender implantar estándares muy sofisticados ni técnicas que supongan un coste innecesario para la empresa.

La estandarización aporta numerosos beneficios relacionados con la reducción de costes de producción y tiempos de fabricación. Los principales son:

- Preserva el conocimiento y la experiencia.
- Proporciona una forma de medir el desempeño.
- Muestra la relación entre causas y efectos.
- Proporciona una base para el entrenamiento y formación del personal.
- Provee una base para el diagnóstico y la auditoría.
- Supone una base para el mantenimiento y mejoramiento de la forma de hacer el trabajo.
- Provee medios para prevenir los errores.
- Minimiza los fallos y la variación de productos a partir de estándares.

Estandarizar implica hacer el trabajo de la mejor forma posible, siguiendo patrones, diagramas e imágenes del proceso a seguir y del producto a fabricar, para eliminar costes y agilizar los procesos de producción.

3.2.3.4. TPM

El Mantenimiento Productivo Total o TPM (Total Productive Maintenance) es un conjunto de técnicas y medidas concebidas para optimizar los equipos e instalaciones de una planta de producción mediante la eliminación de defectos, paradas y accidentes. Este tipo de mantenimiento requiere la colaboración de todos los departamentos y la implicación de cada operario. Cada trabajador se ocupa de la preparación, revisión, mantenimiento y limpieza de la maquinaria que utiliza, por lo que se requiere una metodología y formación adecuada y un conocimiento profundo de los equipos.

El TPM se fundamenta en ocho pilares que constituyen las estrategias a desarrollar y que se basan en la metodología 5 S para lograr un mantenimiento cimentado en la organización, el orden, la limpieza y la disciplina, sujeto a unos estándares establecidos.

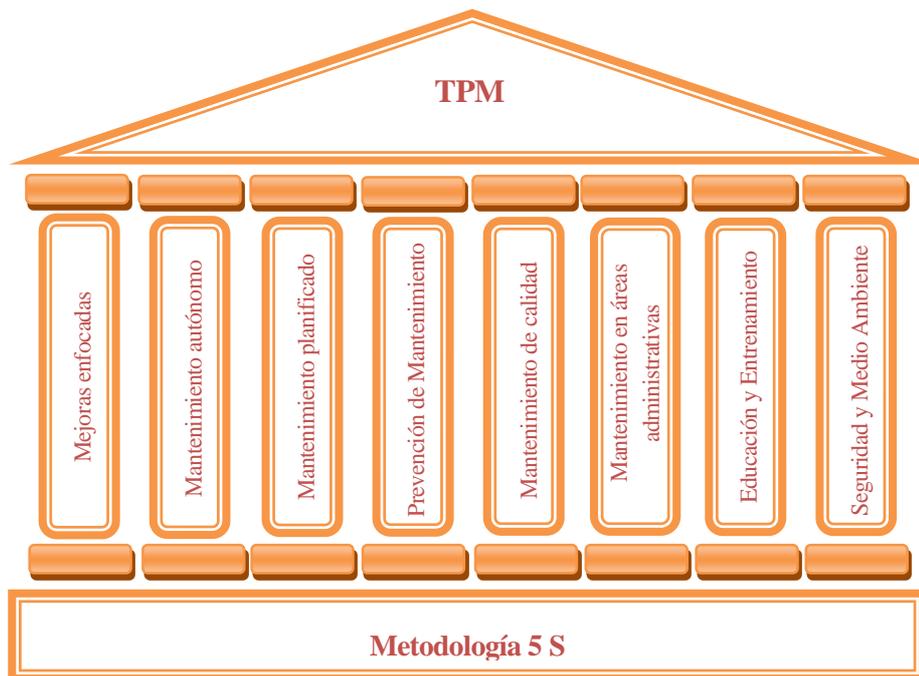


Figura 3. 8. Pilares TPM. Fuente: Elaboración propia.

- **Mejoras enfocadas**

En este pilar se encuentra la metodología necesaria para encontrar la causa raíz de los problemas y estimar el tiempo para eliminarla. Las mejoras enfocadas son un conjunto de actividades que cuenta con la intervención de las diferentes áreas comprometidas en el proceso productivo y que busca la mejora de equipos, procesos o procedimientos para erradicar las pérdidas, estableciendo un plan de acción. El objetivo final es maximizar la efectividad global de los equipos mediante equipos de trabajo multifuncionales.

- **Mantenimiento autónomo**

Este pilar está enfocado al operario, pues es el que tiene la capacidad de alargar la vida útil de la maquinaria que emplea. El mantenimiento autónomo se compone de un conjunto de tareas que realizan diariamente los empleados sobre sus equipos y máquinas de trabajo. Estas tareas incluyen la inspección, la lubricación, la limpieza, el cambio de herramientas y útiles, las pequeñas intervenciones correctivas sobre la maquinaria y el seguimiento del buen funcionamiento de la misma. El objetivo es involucrar al operario en el cuidado y la conservación del equipo con el que trabaja a través de una exigente preparación profesional y de la estandarización de las operaciones.

- ***Mantenimiento planificado***

El mantenimiento planificado emplea acciones de mejora, de prevención y de predicción para eliminar los problemas que surgen en los distintos equipos. El conjunto de estas operaciones requiere de información y bases de datos de dichos equipos, de dispositivos de medición y de tecnologías de mantenimiento, además de personal especializado en este tipo de tareas. El fin último es lograr los objetivos “cero” mediante la eliminación de situaciones que se desvían de la normalidad: cero averías, cero defectos, cero despilfarros, cero accidentes y cero contaminaciones.

- ***Prevención de mantenimiento***

Este pilar pretende reducir el deterioro de los equipos a la vez que se consigue que sean fiables, seguros y fáciles de operar y mantener. La prevención de mantenimiento son inspecciones que se realizan en el diseño, fabricación, instalación y puesta a punto de los equipos para detectar condiciones de operación que puedan derivar en averías o pérdidas de equipos. Su objetivo es minimizar los costes de mantenimiento desde el inicio de la vida útil de los equipos.

- ***Mantenimiento de calidad***

El propósito de este pilar es mejorar la calidad del producto reduciendo el número de defectos por lote de fabricación, implantando un modo de funcionamiento en los equipos donde sea posible producir con cero defectos. Para ello se realizan operaciones de mantenimiento orientadas al cuidado de los equipos para que no generen defectos, se certifica maquinaria empleada para prevenir defectos de calidad, se cuantifican y controlan las variaciones de las características de los equipos y se realizan estudios de ingeniería para identificar y mejorar las partes del equipo que inciden en la calidad del producto.

- ***Mantenimiento en áreas administrativas***

Los departamentos de planificación, desarrollo y administración no añaden valor al producto directamente, sin embargo, estas tareas son esenciales para la fabricación del mismo. Se busca el funcionamiento eficiente de la administración, para garantizar el equilibrio entre los procesos productivos que añaden valor, y las actividades de soporte.

- ***Educación y entrenamiento***

Con este pilar se desea desarrollar y aumentar las capacidades y habilidades del personal mediante instrucción y formación profesional específica. Se busca el conocimiento, control, manejo, mantenimiento, responsabilidad, autosuficiencia y destreza necesaria del operario sobre los equipos con los que opera. Las principales habilidades que los operarios deben desarrollar son: comprender el funcionamiento de los equipos; entender la relación entre los componentes de los equipos y las características de calidad del producto; detectar, analizar y resolver problemas de funcionamiento; preservar el conocimiento aprendido y enseñar o ayudar a otros compañeros; trabajar en equipo y cooperar con las distintas áreas de producción.

- ***Seguridad y Medio Ambiente***

La seguridad de las personas y del entorno de trabajo debe conservarse mediante acciones conjuntas de prevención de riesgos laborales, para que el ambiente de trabajo sea confortable y seguro. Muchos accidentes son ocasionados por malas prácticas o distribuciones incorrectas de equipos, herramientas y útiles. Por ello, se ha de formar a los empleados sobre los riesgos en el trabajo y sobre la prevención de dichos riesgos mediante cursos de formación. Asimismo, este pilar trata las políticas medioambientales establecidas por el Gobierno que se han de cumplir para minimizar la contaminación en el entorno de trabajo y al medio ambiente.

El TPM establece seis tipos de pérdidas que se generan en torno a los equipos debido al mal aprovechamiento del tiempo efectivo en el proceso de producción: fallos en equipos, preparaciones de máquinas y ajustes, reducción de velocidad, inactividad y paradas breves, defectos y trabajos rehechos, y arranques. De hecho, si se establece un tiempo disponible de producción y a éste se le resta el tiempo disipado por dichas pérdidas, resulta un tiempo productivo neto muy inferior al tiempo disponible inicial. Estas seis grandes pérdidas se relacionan con la disponibilidad, la eficiencia de rendimiento o productividad y la tasa de calidad de los productos que pueden definirse mediante las siguientes fórmulas matemáticas:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo de funcionamiento} - \text{Tiempo de parada}}{\text{Tiempo de funcionamiento}} \cdot 100$$

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Cantidad fabricada}}{\text{Cantidad ideal a fabricar}} \cdot 100$$

$$\text{Calidad} = \frac{\text{Cantidad sin defectos}}{\text{Cantidad fabricada}} \cdot 100$$

De esta forma la disponibilidad depende de los fallos en los equipos y de la preparación y ajuste de las máquinas. La productividad se relaciona con la inactividad, las paradas breves y la reducción de velocidad de operación, mientras que la calidad se asocia a los defectos en los procesos y a los arranques de los equipos.

Por otra parte, el TPM hace uso de numerosos indicadores que muestran la presencia o ausencia de anomalías en el proceso productivo. Uno de estos indicadores es el *Índice de Eficiencia General del Equipo (OEE)*. Este indicador se calcula como el cociente del tiempo de funcionamiento efectivo de un equipo y el tiempo disponible. En otras palabras, compara el tiempo de producción del que se dispondría para producir sin que se produjese ningún desperfecto y el tiempo real de producción sin defectos. De esta forma, si se tiene un OEE de un 75% significa que de 100 piezas sin defectos que podría producir la máquina, sólo se han obtenido 75 piezas con cero defectos. Este índice está íntimamente relacionado con las pérdidas en los equipos, por lo que también puede definirse una vez conocidas la disponibilidad, la productividad y la calidad de cada uno de ellos con la siguiente expresión:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \cdot \text{Productividad} \cdot \text{Calidad}$$

El objetivo final del TPM es maximizar la eficacia de los equipos desarrollando un sistema de mantenimiento productivo para toda la vida útil de los mismos, implicando activamente a todos los empleados y a todos los departamentos que diseñan, utilizan y mantienen estos equipos.

3.2.3.5. SMED

SMED (Single Minute Exchange of Die) o “cambio rápido de herramientas” es un conjunto de técnicas Lean que persiguen la reducción del tiempo de preparación de una máquina o de cambio de una herramienta a otra dentro de una secuencia de operaciones en la cadena de fabricación. Estas técnicas permiten la reducción del tamaño de los lotes, evita acumular inventario en los almacenes y puede aumentar la capacidad de las máquinas sin necesidad de adquirir maquinaria nueva. Esto se traduce en aumento de la flexibilidad, entregas rápidas y mayor productividad. La aplicación de esta herramienta Lean no es trivial, ya que se debe tener plena conciencia del alcance de estas técnicas. Asimismo, previamente a la implantación de SMED, se debe concienciar a los trabajadores de las carencias de la empresa y de la necesidad de reducción de tiempos de fabricación, mediante formación y entrenamiento.

Su traducción literal es “cambio de útiles en minutos de un solo dígito”, es decir, cambiar los útiles y herramientas en un tiempo inferior a 10 minutos. Sin embargo, se ha de tener presente que no siempre se van a poder realizar cambios de herramienta en menos de 10 minutos. No obstante, la aplicación de estas técnicas siempre ayuda a reducir el tiempo de dichos cambios.

Los procedimientos de cambios de herramientas son numerosos y variados debido a los múltiples tipos de útiles y herramientas que se emplean en la fabricación de piezas. Dichos procedimientos pueden englobarse principalmente en cuatro categorías:

- Preparaciones, ajustes post-proceso y verificaciones.
- Centrar, dimensionar y fijar otros parámetros.
- Producción de piezas de ensayo y útiles.
- Montar y desmontar útiles.

La identificación de las operaciones de cambio de herramientas es esencial para la implantación de las técnicas SMED que se lleva a cabo mediante tres etapas:

▪ **Primera etapa: separación de operaciones internas y externas**

Los cambios de útiles y herramientas requieren una serie de operaciones que pueden ser internas o externas:

- *Las operaciones internas* son las actividades que se realizan con la máquina parada. Suelen ser cambios de herramientas de corte, como cuchillas, fresas, discos rectificadores, etc.
- *Las operaciones externas* son las que pueden llevarse a cabo mientras la máquina funciona. En este tipo de operaciones se incluyen los desplazamientos de utillaje al almacén.

Para la separación de operaciones lo más habitual es asegurar que las operaciones externas se puedan realizar cuando la máquina está en marcha. Para ello, se emplean listas de comprobación donde los útiles necesarios para comenzar a trabajar estén disponibles en todo momento, se realizan comprobaciones funcionales de las diferentes herramientas y se mejora y agiliza el transporte de útiles y piezas.

▪ **Segunda etapa: conversión de operaciones internas en externas**

El segundo paso es identificar qué operaciones internas pueden realizarse aún con la máquina en marcha, para luego cambiarlas a externas y así reducir el tiempo que la máquina permanece parada. Para llevarlo a cabo se mejoran los métodos empleados y se realizan modificaciones simples del equipamiento y de los útiles. En la medida de lo posible se deben reducir los ajustes iniciales de posicionamiento de útiles sobre piezas, fijando las posiciones de antemano, para disminuir el tiempo empleado.

▪ **Tercera etapa: perfeccionar las operaciones internas y externas**

En esta última etapa se persigue el perfeccionamiento de todo tipo de operaciones. Para ello, existen varias propuestas de mejora para cada tipo de operaciones:

- *Mejoras para las operaciones de preparación internas*, mediante la realización de operaciones en paralelo, estandarizando las tareas, la utilización de elementos de fijación rápidos y la automatización de procesos.
- *Mejoras para las operaciones de preparación internas*. Se consiguen perfeccionando el transporte y el almacenamiento de útiles y piezas, implantando, por ejemplo, la metodología de las 5 S, que se detalla en el siguiente apartado.

La reducción del tiempo de cambio de herramientas en máquinas mediante la herramienta SMED puede evitarse si se dispone de la maquinaria adecuada. Cuanta más capacidad tenga una máquina, más tiempo necesita para realizar cambios de utillaje. Por tanto, al elegir una máquina u otra para un sistema de producción hay que tener en cuenta tanto la capacidad como la flexibilidad para realizar cambios. Esto supondrá una reducción de tiempo y costes sin emplear SMED.

3.2.3.6. Las 5 S

Las 5S es una herramienta Lean que permite mantener el puesto de trabajo de los operarios ordenado, limpio, agradable y seguro, facilitando el trabajo dentro de él. Es una práctica de calidad ideada en Japón para el Mantenimiento Integral de la empresa y su nombre hace referencia a las cinco palabras que en japonés designan la organización, el orden, la limpieza, el mantenimiento de estándares y la disciplina, que comienzan por la letra “S”: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke.



Figura 3. 9. Las 5 S. Fuente: Elaboración propia.

- **La primera S: SEIRI – Organización**

El primer paso y quizá el más importante del programa 5S es organizar y separar lo que realmente es necesario de lo que no lo es, para luego eliminar lo que no se necesita. Toda clase de objetos, desde herramientas, documentos, aparatos rotos o inútiles hasta los valiosos, pero que se usan rara vez, pueden contribuir al desorden. Por ello, es importante eliminar del lugar del trabajo todo aquello que no se necesite o se encuentre en mal estado. Para distinguir lo útil de lo que no lo es se pueden plantear las siguientes preguntas: “¿Para qué sirve?”, “¿Quién lo utiliza?”, “¿Con qué frecuencia se utiliza?” o “¿Está en el lugar adecuado?”.

- **La segunda S: SEITON – Orden**

El orden no es más que situar cada cosa en su sitio. Una vez clasificados los elementos como necesarios es fundamental colocarlos de manera que se encuentren con facilidad y definir su lugar de ubicación, identificándolos para facilitar su búsqueda y retorno a su posición inicial. Se debe decidir la manera de ordenar los útiles y herramientas de acuerdo a la persona que las utilice, situándolas a una altura y distancia cómodas y posicionando cada objeto en un lugar seguro de rápida visualización.

- **La tercera S: SEISO – Limpieza**

Para una buena organización y un correcto orden es necesario limpiar e inspeccionar el entorno de trabajo para identificar y eliminar las fuentes de suciedad y contaminación. Se debe comenzar por una limpieza a fondo de los equipos y puestos de trabajo para así eliminar polvo, suciedad, virutas, humo, olores desagradables y objetos inservibles. Es de gran importancia crear conciencia de limpieza y pulcritud diaria en los operarios, ya que conservar los útiles y herramientas en condiciones óptimas ayuda a mantener el orden y un entorno más agradable en el que trabajar.

- **La cuarta S: SEIKETSU – Estandarizar**

Estandarizar consiste en emplear un método para ejecutar un determinado procedimiento y evitar cometer errores. Se trata de establecer un estándar para mantener las tres primeras “S” y de asegurarse que dichos estándares se cumplan y estén actualizados para cada puesto de trabajo.

- **La quinta S: SHITSUKE – Disciplina**

La disciplina es la base para mantener el sistema de las 5 S. Su objetivo es el cumplimiento de las normas establecidas en cuanto a organización, orden, limpieza y mantenimiento de estándares. Para mantener la disciplina es necesario formar y actualizar dicha formación a los trabajadores en materia de las 5 S para convertir en hábito el empleo de los métodos establecidos y estandarizados.

3.2.3.7. Kanban

Kanban es un sistema de comunicación, control y seguimiento de la producción basado en tarjetas o señales (kanban, en japonés) que advierten de una necesidad dentro de la cadena de producción. Se basa en un sistema en el que se tira de la producción mediante el uso de estas tarjetas que se adjuntan a envases o contenedores de los correspondientes materiales o productos, de forma que cada contenedor tiene su tarjeta y la cantidad que refleja es la que debe tener el envase o contenedor. Según su uso existen dos tipos de tarjetas kanban:

- *Kanban de fabricación.* Indica la cantidad que debe ordenarse que produzca el proceso anterior.
- *Kanban de movimiento.* Indica qué y cuánto material hay que retirar de un proceso para enviarlo al siguiente.

Estas tarjetas recogen diferente información, como la denominación y código de la pieza a fabricar o transportar, cantidad de piezas a producir, lugar de almacenamiento de origen y destino, etc. Se convierten en el mecanismo de comunicación de las órdenes de fabricación entre las diferentes estaciones de trabajo, facilitando la retroalimentación y las acciones rápidas de corrección cuando se necesitan. Para ello, se establecen una serie de normas que se han de respetar para el correcto funcionamiento del sistema:

- Prohibido retirar piezas sin la utilización de kanban.
- Prohibido retirar un número mayor de piezas que el número indicado en el kanban.

- Prohibido producir cantidades superiores a lo establecido en las tarjetas kanban.
- Un kanban debe adherirse a un objeto físico o contenedor.
- El proceso precedente debe fabricar en las cantidades recogidas por el proceso siguiente.
- Los productos defectuosos no deben pasar al proceso siguiente.
- El número de kanban debe minimizarse.

| | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-----|----------------------|
| ... | Pieza N° | ... | Proceso final |
| | Nombre de la pieza | ... | ... |
| | Tipo de contenedor | ... | |
| | Capacidad del contenedor | ... | |
| Aspecto de la pieza | | | |

a)

| | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-----------------------|
| Proceso inicial | Lugar de almacenamiento | ... | Proceso final |
| Centro de trabajo | Pieza N° | ... | Centro de trabajo |
| | Nombre de la pieza | ... | |
| Lugar de expedición | Tipo de contenedor | ... | Lugar de recepción |
| Área de trabajo inicial | Capacidad del contenedor | ... | Área de trabajo final |

b)

Figura 3. 10. Ejemplos de kanban de a) producción y b) fabricación.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.8. Gestión Visual

La gestión visual permite que los estándares estén presentes de forma rápida y continua en el área de trabajo. Para ello, se hace uso de dispositivos de control visual, información, códigos de color, tarjetas, paneles, tableros e indicadores que crean un lenguaje visual común para todos los empleados. Este conjunto de herramientas facilita la comunicación hombre-máquina-entorno permitiendo:

- Informar de forma inmediata sobre la situación del área de trabajo.
- Distinguir adecuadamente entre lo que es normal y lo que no lo es.
- Hacer que las anomalías y desperdicios sean obvios y fáciles de reconocer.
- Solventar rápidamente los problemas que muestre el sistema de control visual.
- Descubrir constantemente aspectos que necesitan mejorarse.

Este tipo de gestión permite tener un control visual de la producción, de la calidad y de la mejora. Dentro de todos los dispositivos de la gestión visual pueden destacarse los tres tipos más relevantes:

- **Territorio.** Es muy importante conocer el área que delimita la zona de trabajo e identificar qué actividades, recursos y productos competen a dicha zona. Asimismo deben diferenciarse los carriles de transporte de material por los que circulan pequeños vehículos o carretillas. Los dispositivos de control visual de territorio son:
 - Marcas de colores en el suelo para delimitar los diferentes territorios.
 - Marcas sobre herramientas, útiles y estantes que indican a qué área pertenecen.
 - Paneles con la distribución en planta total dividida por territorios mediante códigos de colores o señales.

- **Paneles y tableros.** En cada zona de la planta se trabaja conforme a unos estándares determinados y a un ritmo diferente, por lo que es esencial la presencia de paneles que indiquen la evolución de la producción de acuerdo a las pautas establecidas. La información proporcionada ha de ser entendible fácilmente y debe actualizarse continuamente. De igual forma, en las áreas comunes han de existir tableros con la información pertinente a las áreas que informa, para enlazar y completar el trabajo de las mismas.
- **Indicadores visuales.** Los indicadores visuales son gráficos de colores estandarizados que muestran información muy variada: datos numéricos, situación de la empresa, conductas de trabajo, etc. Igualmente se emplea el sistema de luces Andon mediante el que se tiene rápido control de las incidencias que ocurren. Los indicadores se colocan sobre los paneles y tableros y en algunas zonas de trabajo.



Figura 3. 11. De izquierda a derecha: marcas de territorio, tablero e indicadores visuales.

Fuente: www.adypi.com

3.2.3.8.1. Paneles SQCDP

Unos de los beneficios de la gestión visual es la rápida detección de los problemas que impiden continuar con la producción o que perjudican su funcionamiento de algún modo, afectando a la maquinaria o a los propios empleados. Los paneles SQCDP constituyen una herramienta eficiente que permite obtener una visión global del área de trabajo facilitando la identificación, visualización y registro de las tareas, operaciones, incidentes, paradas y mejoras, así como el control global de la planta de producción. El nombre de estos paneles, SQCDP, hace referencia a las siglas en inglés de los temas que se abordan en cada uno de ellos:

- S: Seguridad (Security)
- Q: Calidad (Quality)
- C: Coste (Cost)
- D: Entrega (Delivery)
- P: Personas (People)

Estas cinco materias dividen el gran panel vertical en cinco columnas y constituyen los cinco objetivos a alcanzar en cada área de la producción: seguridad e higiene en el entorno, calidad en productos y procesos, disminución de costes, entrega a tiempo y trabajo del personal.

En cada columna se colocan hojas de papel con los distintos indicadores de desempeño que recogen los parámetros que se desean medir. Suelen formar tres o cuatro filas, aunque se pueden añadir más, siempre que la información sea relevante y aporte mejoras al sistema productivo. Cada fila de hojas tiene una función específica:

- **Hojas visuales.** Estas hojas constituyen la primera fila del panel y en ellas se colocan el resultado de los indicadores visuales. En cada columna se sitúa la letra correspondiente al tema tratado (S, Q, C, D o P) dividida en los días del mes. Cada día se colorea la casilla correspondiente de verde, si

todo es correcto, o de rojo si ha ocurrido algún tipo de problema. De esta forma se tiene un control del funcionamiento correcto o incorrecto del área con un simple vistazo, sin entrar en más detalles.

- **Hojas de problemas.** Se sitúan en la segunda fila. Cuando el indicador se muestra de color rojo, indica que ha ocurrido algún error, problema o incidente. Se debe elaborar un plan de acción para buscar las posibles soluciones, ya sean inmediatas o a largo plazo.
- **Hojas de diario.** Ocupan la tercera fila del panel y en ellas se colocan los indicadores que diariamente miden los parámetros y recogen los resultados obtenidos de cada una de las cinco categorías.
- **Hojas de tendencias.** Se encuentran en la última fila para resumir los logros y recoger datos a lo largo de un período de tiempo determinado, generalmente un mes o un año. Exponen gráficas de evolución de indicadores y consecución de metas frente a lo planificado.

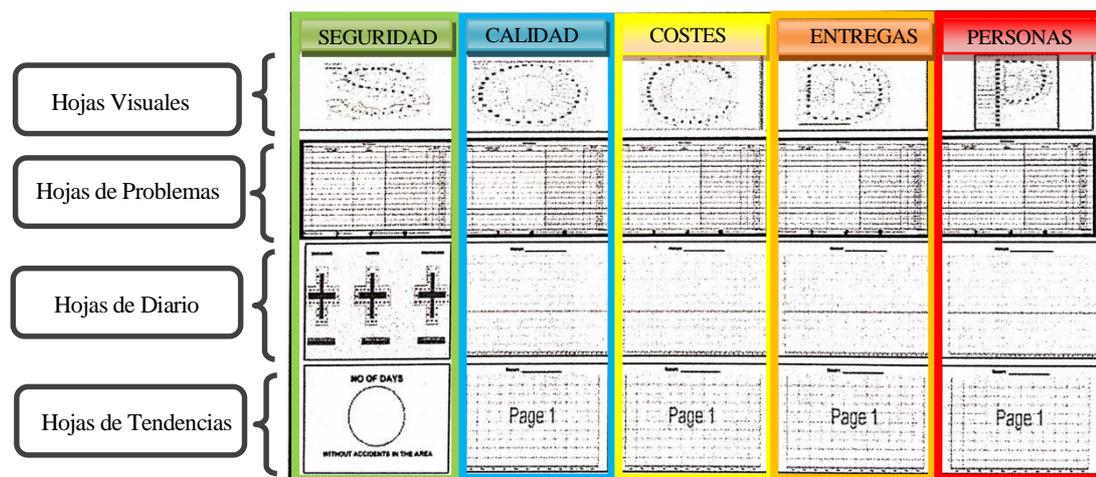


Figura 3. 12. Panel informativo SQCDP. Fuente [11].

Es conveniente que cada estación o área de trabajo cuente con su propio panel SQCDP, de forma que todos los trabajadores se mantengan informados y cuenten con los beneficios que aportan:

- Mejora la gestión visual de la planta.
- Motiva a los empleados a buscar soluciones a medio o largo plazo.
- Ayuda a identificar los problemas y buscar la causa raíz de los mismos.
- Repercute en la reducción de costes e incrementa la satisfacción del cliente.
- Evita que los problemas queden sin resolverse, imponiendo rápidamente acciones correctoras.

3.2.3.9. KPI

Un KPI (Key Performance Indicator) es un Indicador Clave de Desempeño que muestra el estado de una actividad o proceso. La recogida de datos resulta útil tanto para tener un seguimiento continuo de los procesos como para detectar variaciones y resultados que no se ajustan a los niveles de normalidad preestablecidos. No existe una lista cerrada de indicadores, sino que se puede establecer un KPI para cualquier aspecto medible. En otras palabras, se puede tener un indicador de cualquier parámetro que se desee medir. Algunos de estos indicadores son:

- *De producción:* coste unitario, tiempo de producción, eficiencia de un proceso, etc.
- *De logística:* rotación de inventario, número de pedidos, cantidad de stock, etc.
- *De calidad:* porcentaje de defectos, costes de no calidad, número de interrupciones de un equipo, etc.
- *Económicos y financieros:* ingresos, beneficios, rentabilidad, VAN, TIR, etc.
- *De cliente:* número de clientes, satisfacción, número de quejas y reclamaciones, etc.
- *Otros:* consumo por hora, accidentes por mes, etc.

Para diseñar un buen indicador es necesario determinar todos los aspectos que lo definen:

- **Definición:** identificar y describir qué se va a medir.
- **Ratio:** fórmula o ecuación que se emplea para calcular el valor exacto del dato que se está midiendo.
- **Unidades:** se debe especificar, junto al valor, las unidades en las que se mide.
- **Periodicidad:** frecuencia a la que se desea medir: cada hora, diariamente, semanalmente, mensualmente, etc.
- **Proceso:** actividad asociada al indicador.
- **Responsable:** persona o departamento a cargo de la actividad o proceso que se está midiendo. Es el destinatario de los resultados obtenidos de la medición.
- **Objetivo:** valor que se desea alcanzar en un plazo corto de tiempo. Este objetivo debe ir creciendo a medida que se van logrando los anteriores.
- **Expectativa:** valor ideal del indicador, que no siempre se podrá alcanzar.
- **Límites legales:** valor, impuesto por ley, por encima o por debajo del cual no puede operar el dato que se mide.
- **Límite de aceptabilidad:** valor mínimo establecido por el responsable del indicador a partir del cual se considera que el proceso o actividad opera adecuadamente.
- **Propósito del indicador:** finalidad y utilidad de los resultados medidos.
- **Grupos de interés:** personas o departamentos a los que les beneficia obtener los datos últimos de desempeño de un proceso: clientes, empleados, directivos, etc.
- **Soporte:** almacenamiento de los datos recogidos que puede ser en soporte electrónico o en papel.

Por tanto, un indicador debe estar bien definido, es decir, debe ser comprensible fácilmente, tener asociadas unas unidades de medida y ser medido en períodos regulares de tiempo para comparar su variabilidad. Así mismo se deben establecer unas referencias, límites u objetivos para obtener conclusiones acerca de las medidas tomadas.

3.2.3.10. VSM

El Mapa de Flujo de Valor o, en inglés, Value Stream Mapping (VSM) es una herramienta de gestión visual que permite representar, analizar y mejorar la cadena de valor y los flujos de operaciones, materiales, productos e información durante la cadena de fabricación. Permite tener una visión global y completa de toda la cadena de valor, por lo que se puede controlar todo el proceso productivo evitando centrar la atención en procesos aislados. Además de los flujos, en el VSM también quedan reflejados los tiempos de operación sobre el producto y el tiempo que se encuentran en espera para ser procesados, por lo que se puede controlar el *Lead Time* o tiempo de espera total entre proveedor y cliente.

Esta herramienta consiste en una representación con símbolos estandarizados que tiene como fin plasmar en un papel todas las actividades productivas para identificar la cadena de valor y los lugares donde se producen los desperdicios para eliminarlos. Para ello, se elaboran dos mapas de la cadena de valor, uno presente y otro futuro, donde se reflejan la situación actual y los cambios necesarios que habrá que realizar para alcanzar las mejoras deseadas:

- El diagrama que muestra la situación actual se diseña a partir de una familia de piezas o un producto determinado. Mediante un equipo multidisciplinar de trabajadores se analizan las operaciones, procesos de fabricación, tiempos de producción, tiempos de cambio de utillaje, etc. Asimismo se determinan los flujos de materiales de una estación de trabajo a otra, la cantidad de inventarios y materias primas y los flujos de información entre proveedores, empresa y cliente.
- El diseño del mapa de flujo de valor futuro parte de la situación actual de la empresa. La principal causa de mejora es el tiempo de producción de un producto. Una vez actualizado el Takt Time del producto se vuelven a determinar los tiempos de producción en cada proceso y los flujos de materiales. En caso de que el sistema de producción no sea Pull, habrá que realizar los cambios necesarios para que se produzca en cada momento sólo la cantidad requerida por el cliente. De igual forma se anotan todos los cambios y planes de mejora que se crean oportunos realizar para la eliminación de desperdicios.

Los símbolos que se emplean en el VSM están estandarizados y se muestran en la siguiente figura.

| SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN |
|--------------------|---|---------|---|
| Producción | | | |
| | Proceso de fabricación. | | Célula de trabajo. |
| | Proceso de fabricación compartido. Proceso que comparten varios productos. | | Operador. Generalmente se acompaña de un número que indica el número de trabajadores en cada proceso. |
| | Tabla de parámetros de un proceso: tiempo de ciclo (C/T), tiempo de cambio (C/O), número de piezas (NP), porcentaje de defectos, etc. | | Proveedor/Cliente. Origen y destino de la cadena de flujo de valor. |
| Materiales | | | |
| | Buffer. Punto de acumulación de material para hacer frente a fluctuaciones de la demanda. | | Stock de seguridad. Punto de acumulación de material para hacer frente a problemas internos: defectos, averías, etc. |
| | Supermercado. Dispone de una cantidad de referencia que se repone según el consumo registrado. | | Caja Heijunka. Nivelación del flujo de materiales. |
| | FIFO. Retirada de material donde sale lo primero que ha entrado. | | Flujo de materiales |
| | Flujo de materiales PUSH. El material avanza independientemente del material consumido. | | Flujo de materiales PULL. El material avanza a medida que se retira material de la estación posterior. |
| | Señal Kanban. Fabricación de un lote de productos. | | Tarjeta Kanban. Puede ser de movimiento o de producción. |
| | Tarjetero Kanban. | | Transporte de material por carretera. |
| Información | | | |
| | Flujo de información electrónica. Documentos en soporte electrónico: e-mail, archivos de MS Office, etc. | | Flujo de información manual. Documentos en papel. |
| | Información de proceso. Datos variados: órdenes de fabricación, mantenimiento, etc. | | Base de datos. Sistema informático. |
| | Comunicación verbal. | | |

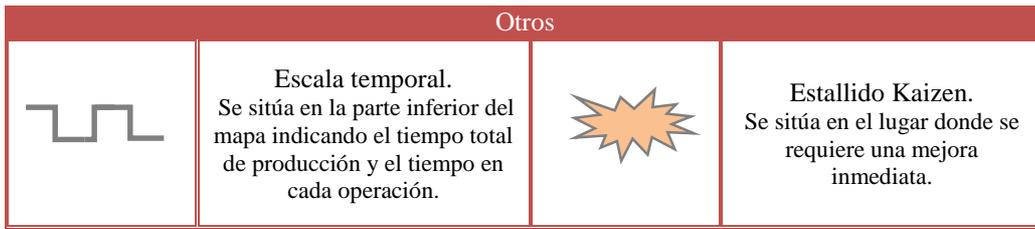


Figura 3. 13. Simbología estándar VSM. Fuente: Elaboración propia.

La visualización global del estado de la producción mediante el VSM ayuda a identificar el flujo de valor, detectar los posibles desperdicios, promover el trabajo en equipo y establecer unos objetivos concretos y un plan de acción para la mejora.

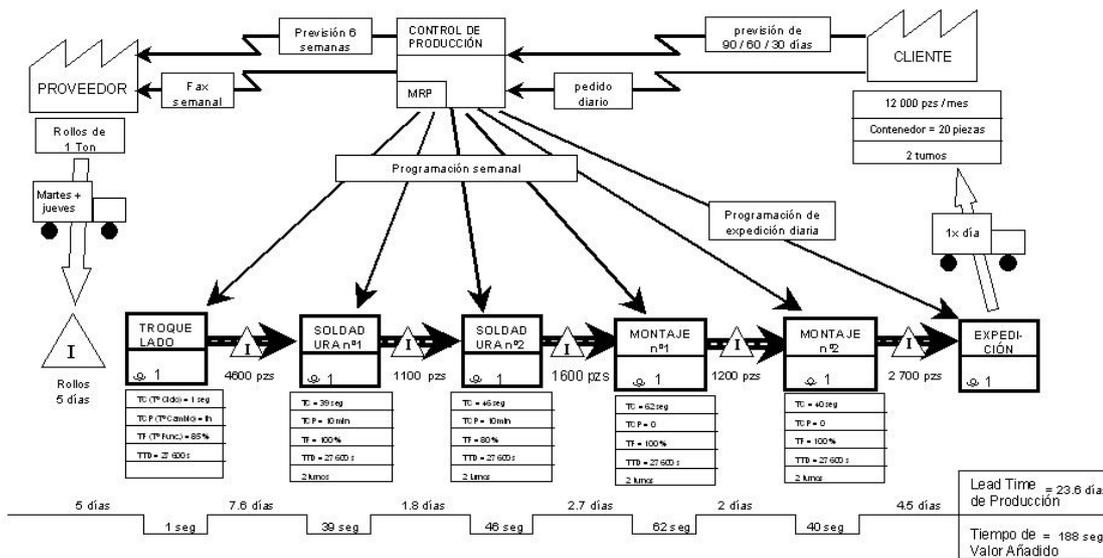


Figura 3. 14. Ejemplo de mapeo de flujo de la cadena de valor. Fuente: www.human.es

3.2.3.11. Kaizen: La Mejora Continua

Kaizen es un término japonés cuya traducción literal es *kai = cambio* y *zen = mejor*, es decir, un cambio a mejor o para mejorar, una mejora continua. Este concepto requiere un cambio en la mentalidad de toda la organización, tanto de los operarios como de los directivos de la empresa y fomenta el compromiso, la disciplina y la utilización de las capacidades de todo el personal.

El espíritu de mejora continua se refleja en la frase “*Hoy mejor que ayer, mañana mejor que hoy*” y se basa en un continuo progreso que, con pequeñas y constantes innovaciones, pretende alcanzar la excelencia y mantener la competitividad del negocio. Cuando las pequeñas mejoras ya no produzcan un cambio apreciable, se debe pensar en cambiar no sólo en la forma de actuar, sino en un cambio de las instalaciones y de los equipos que se emplean.

Los 10 principios básicos de la mejora continua son:

- Buscar el cambio en cualquier aspecto.
- No buscar la perfección inmediata. Ésta debe ser continua y gradual.
- Corregir los errores lo más rápido posible.
- Fomentar el trabajo en equipo para encontrar soluciones a los problemas.
- Buscar la causa raíz, planteando los *5 porqués* y encontrar la solución.
- Encontrar ideas y soluciones en las situaciones adversas.
- Reflexionar sobre cómo se puede abordar un cambio en lugar de pensar en por qué no se puede hacer.

- No realizar costosas inversiones apresuradamente sin antes mejorar las pequeñas cosas.
- Implantar las mejoras propuestas lo antes posible.
- La mejora es infinita.

Existen varias herramientas para implementar y llevar a cabo lo propuesto por Kaizen. Éstas son el diagrama causa-efecto de Ishikawa, el principio de Pareto y Seis Sigma, que se detallan a continuación.

3.2.3.11.1. Diagrama causa-efecto de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa, también llamado “*espina de pescado*” por su estructura, consiste en una representación gráfica que ayuda a identificar las posibles causas de un problema, de un error en un proyecto, de un defecto en un producto o de un resultado obtenido por debajo del objetivo previsto.

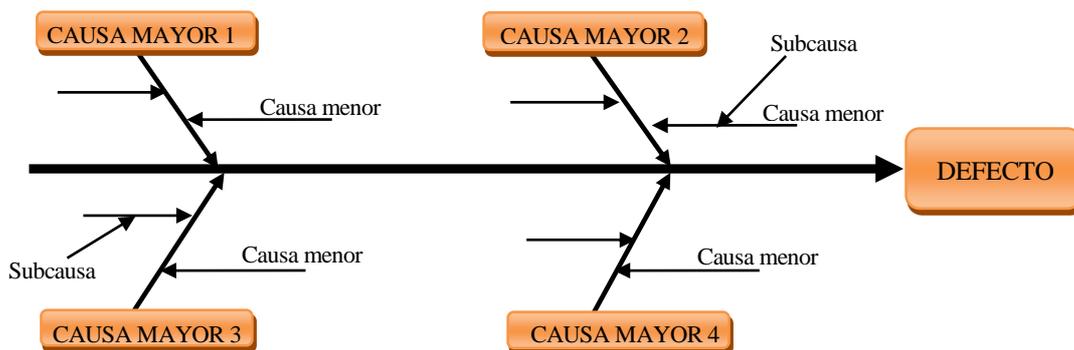


Figura 3. 15. Diagrama causa-efecto de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia.

Para la búsqueda inicial de causas y soluciones de un problema es conveniente realizar un *Brainstorming* o tormenta de ideas. Consiste en la participación activa de un grupo de personas que se reúnen para solucionar una cuestión. Una vez lanzado el tema a discutir, todos los integrantes del grupo deben aportar las ideas que se les ocurran, por muy poco efectivas que puedan parecer. A medida que avanza la reunión las ideas van tomando forma gracias a las aportaciones de todos. Una vez anotadas todas las posibles ideas, causas y soluciones se inicia la elaboración del diagrama.

En la espina central se sitúa el defecto o el error que se desea corregir, que es el efecto de las causas que se quieren encontrar. Una vez percibido el defecto deben encontrarse las causas más próximas y evidentes de dicho defecto, las causas mayores. Reflexionando sobre el por qué se han generado dichas causas se encontrarán las causas menores, y así se procede sucesivamente hasta encontrar las causas raíces que originan las demás y el defecto final.

De esta forma se obtiene un esquema organizado de las causas y efectos de un proceso, que ayuda a encontrar soluciones mediante el trabajo en equipo y coordinación del personal para una mejora del mismo.

3.2.3.11.2. Diagrama de Pareto

Vilfredo Pareto, sociólogo y economista italiano del siglo pasado, observó que la sociedad de su época se dividía en “pocos con mucho” y “muchos con poco” en una proporción aproximada de 80:20, tal que el 20 % de la población mundial tenía el 80 % de la riqueza y el 80 % de la población, sólo el 20 % de los recursos. Esta regla es lo que se conoce como *Principio de Pareto* y es aplicable a cualquier ámbito. En la empresa, por ejemplo, se puede traducir en que el 80 % de los problemas son triviales, mientras que el 20 %, son vitales. Esto sugiere la erradicación inicial del 20% de problemas que son vitales para luego poder centrar la atención en el resto que son de menor importancia.

Para saber cuáles son los problemas que necesitan atención urgente o cuáles son las causas más inmediatas a tratar de un problema determinado, se emplea el *Diagrama de Pareto* junto con el *método AMFEC*. El Diagrama de Pareto es una gráfica que se dibuja siguiendo el sistema de coordenadas cartesianas x-y. El eje horizontal se divide en partes iguales, una para cada problema o causa. El eje vertical se divide en partes de tal forma que el punto más alto representa un número igual a la suma del total. En este eje se sitúa el *Índice de Prioridad de Riesgo o IPR*, definido por el método *AMFEC o Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad*. Este método establece tres criterios a tener en cuenta para priorizar los problemas, fallos o causas.

- **Frecuencia (F)**. Mide la repetitividad u ocurrencia de un determinado fallo. Es la probabilidad de aparición de un problema.
- **Gravedad (G)**. Mide el daño que es esperado que produzca el fallo según la percepción del cliente o usuario.
- **Detectabilidad (D)**. Mide la probabilidad de que el fallo sea detectado durante la ejecución de un proceso. Cuanto más difícil sea detectar el problema y más se tarde en detectarlo, más importantes serán las consecuencias.

Estos criterios están clasificados según niveles de importancia y puntuados con valores adimensionales, según la siguiente tabla.

| PROBABILIDAD | FRECUENCIA | GRAVEDAD | DETECTABILIDAD |
|-----------------|------------|----------|----------------|
| Muy baja | 1 | 1 | 10 |
| Baja | 3 | 3 | 7 |
| Moderada | 5 | 5 | 5 |
| Alta | 7 | 7 | 3 |
| Muy alta | 10 | 10 | 1 |

Tabla 3. 1. Puntuaciones de criterios AMFEC. Fuente: Elaboración propia.

Usando dichos valores se puede calcular el Índice de Prioridad de Riesgo como:

$$IPR = F \cdot G \cdot D$$

Para cada causa o problema, primero se calcula el IPR y luego se obtiene el IPR respecto al total. A continuación se ordenan por orden decreciente y se representan en la gráfica, en forma de rectángulos. Finalmente, se van sumando los IPR y se calcula el % acumulado, que se representa con una línea (línea acumulada). A continuación se presenta un ejemplo cualitativo.

| Causa/ Problema | IPR (% del total) | % Acumulado |
|--------------------|----------------------|----------------|
| 1 | 40 | 40 |
| 2 | 30 | 70 |
| 3 | 15 | 85 |
| 4 | 10 | 95 |
| 5 | 4 | 99 |
| 6 | 1 | 100 |

Tabla 3. 2. IPR calculado para cada causa respecto del total y % acumulado de cada una. Fuente: Elaboración propia.

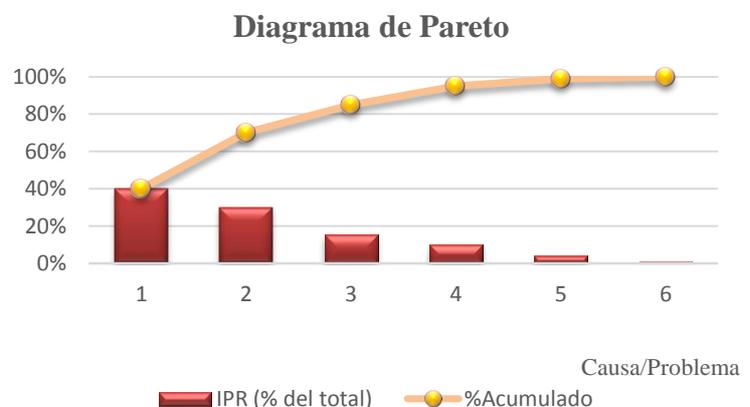


Figura 3. 16. Ejemplo de Diagrama de Pareto. Fuente: Elaboración propia.

Una vez generado el Diagrama de Pareto, es preciso diferenciar los elementos “pocos vitales” de los “muchos triviales”. En la figura anterior, las causas 1 y 2 conformarían los elementos “pocos vitales”, ya que representan en torno al 20% de las causas totales, y tiene un IPR mayor que las demás. Las restantes causas constituyen el 80% de los problemas triviales.

Con este análisis se consigue la identificación de los problemas más importantes en los que se debe centrar la atención para estudiarlos, eliminarlos, y procurar que no vuelvan a aparecer.

3.2.3.11.3. Seis sigma

Seis Sigma es una metodología usada para la gestión empresarial, así como un método estadístico basado en datos para llevar la calidad a los niveles más elevados, mejorando la satisfacción del cliente y reduciendo los defectos y el tiempo del ciclo de producción.

Esta metodología establece seis niveles de desempeño que muestran los defectos por millón que se originan en un proceso determinado. La meta Seis Sigma es llegar a un máximo de 3,4 errores por millón de oportunidades, lo que se traduce en un nivel de funcionamiento correcto del 99.99966 %. Con este ambicioso objetivo, se espera conseguir mejorar el nivel de desempeño global y eliminar los costes asociados a defectos apreciados por el cliente para así conservarlo y capturar nuevos mercados. El método aplicado para llegar al nivel de desempeño requerido se denomina *DMAMC: Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar*:

- *Definir* los problemas o procesos donde son necesarios la aplicación de esta metodología.
- *Medir* datos y parámetros que afectan al funcionamiento del proceso para determinar las causas del problema.
- *Analizar* los resultados actuales e históricos.
- *Mejorar* el diseño y la implementación del proceso.
- *Controlar* el mantenimiento del método Seis Sigma tras su implantación.

Para la correcta implantación de Seis Sigma es conveniente conocer los seis principios fundamentales en los que se basa:

1. **Enfoque en el cliente.** Uno de los objetivos principales de Seis Sigma es garantizar el cumplimiento de los requisitos del cliente para lograr la satisfacción completa del mismo. Por ello, en esta metodología es necesario estudiar y profundizar en las necesidades del cliente para mejorar y redefinir los procesos.
2. **Proceso basado en datos.** La toma de datos es fundamental para valorar el estado y el rendimiento de un proceso identificando qué aspectos deben mejorarse para optimizar los resultados.
3. **Orientación a los procesos.** La atención de esta metodología se centra en los procesos, en su gestión y mejora. Sitúa al proceso como clave del éxito.
4. **Formación proactiva.** Ser “proactivo” significa anticiparse a los acontecimientos, invertir en prevención de problemas. Se deben establecer las prioridades, definir objetivos ambiciosos y revisarlos frecuentemente.
5. **Colaboración integral.** La colaboración, el trabajo en equipo y la participación de toda la organización son fundamentales para la mejora de los procesos y la consecución de objetivos. Se mejora la comunicación y el flujo de información entre los diferentes departamentos.
6. **Búsqueda de la perfección.** El objetivo de toda empresa que aplica esta metodología es lograr la Calidad Total en sus procesos, productos y servicios. Por ello, se ha de trabajar en la Mejora Continua y en la revisión constante de las medidas y métodos empleados.

Estas tres herramientas contribuyen al progreso continuo hacia la excelencia, a la satisfacción del cliente y a la de los propios trabajadores de la empresa, pues tan importante es conservar a un cliente como fomentar la motivación de los que logran conservarlo.

3.3. El ciclo Deming: PDCA

El ciclo Deming o ciclo PDCA es una de las metodologías más importantes de la filosofía Lean. Desarrollado por Walter Andrew Shewhart, pionero del control estadístico de calidad, y divulgado por William Edwards Deming, estadístico estadounidense, representa una estrategia de actuación enfocada a la mejora continua de cualquier actividad que se desee realizar, entendiendo por mejora continua, mejora progresiva de la calidad.

Esta metodología describe los cuatro pasos esenciales que deben llevarse a cabo para mejorar una actividad continuamente: **Planificar** – **Hacer** – **Verificar** – **Actuar** (PHVA), o en inglés: Plan – Do – Check – Act (PDCA), más comúnmente conocido.

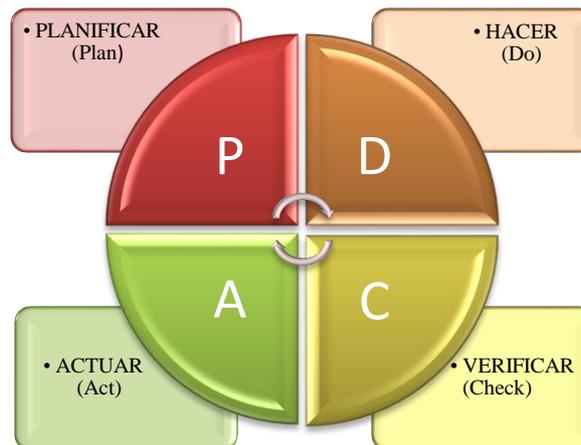


Figura 3. 17. Ciclo PDCA. Fuente: Elaboración propia.

▪ **Planificar**

La planificación comienza con la identificación y la elección de la actividad que se debe mejorar. Posteriormente se observa, analiza y documenta la situación inicial en busca de las causas posibles del problema. Una vez identificadas las causas reales se desarrollan los planes de acción de mejora y se fijan los objetivos a alcanzar. El análisis de la situación inicial debe ser exhaustivo para facilitar la toma de decisiones.

▪ **Hacer**

Esta etapa puede dividirse en dos: formación y puesta en práctica. Una vez elegido el plan de acción a seguir, la dirección debe formar y capacitar a los trabajadores para que ejecuten correctamente las actividades para conseguir el objetivo. Para la puesta en práctica se preparan varias pruebas indicando el modo en el que debe desarrollarse el plan de mejora y se anotan los efectos en las actividades implantadas.

▪ **Verificar**

Tras implantar las acciones de mejora debe comprobarse si el resultado obtenido es el esperado. Mediante un seguimiento se miden los procesos y se comparan con los planificados. De no cumplirse las acciones propuestas, se deberán modificar para ajustarlas.

▪ **Actuar**

En esta última etapa se estudian los resultados y se compara el funcionamiento de las actividades antes y después de la implantación de la mejora. Si el cambio realizado es satisfactorio, se estandariza y se implanta el plan de mejora de forma definitiva. Si no lo es, se examina el ciclo para identificar errores y se comienza un nuevo ciclo PDCA.

Una vez finalizado el ciclo, éste se vuelve a comenzar refutando los estándares anteriores con nuevos planes mejorados. El ciclo PDCA acaba con la concepción de considerar los estándares como objetivos fijos, estableciendo dichos estándares como el punto de partida para hacer un mejor trabajo la próxima vez. Esta metodología se asemeja a una espiral, cuyo crecimiento es infinito. La Organización se debe concienciar que siempre se puede y se debe mejorar en todos los aspectos, y ese es el fundamento de la mejora continua.

3.4. El despilfarro o Muda, Mura y Muri.

Como ya se ha expuesto con anterioridad, el objetivo de la gestión Lean es la reducción o eliminación de desperdicios y actividades que no añaden valor al producto, para lo que resulta esencial conocer qué se entiende por despilfarro así como determinar qué acciones o procesos productivos generan despilfarros para poder eliminarlos. De esta forma se pueden distinguir tres tipos de actividades: las que aportan valor añadido al producto, las que no, y los despilfarros.

- **Las actividades o procesos con valor añadido** son aquellas que transforman la materia prima en un producto de mayor acabado por el que el cliente está dispuesto a pagar.
- **Las actividades sin valor añadido** engloban a todas aquellas que resultan necesarias para el sistema pero que no contribuyen a comunicar valor al producto.
- **El término despilfarro** hace referencia a cualquier actividad o proceso que no incrementa valor al producto y que no es necesaria para el funcionamiento del sistema. Toyota lo define como *“todo lo que no sea la cantidad mínima de equipos, materiales, piezas, espacio y tiempo del operario, que resulten esenciales para añadir valor al producto”*.
A continuación se detallan los grupos en los que se clasifican los despilfarros así como las causas de su origen y la acciones Lean para eliminarlos.

▪ Despilfarros debido a la sobreproducción

El exceso de producción es la fabricación de productos anticipados a su demanda por el cliente. Es erróneo pensar que es ventajoso producir más de lo necesario, ya que esto conlleva un incremento de costes asociado al personal, a la energía y al consumo inútil de materiales, lo que a su vez aumenta el número de transportes y el almacenamiento de material. Por otra parte, si se necesita realizar un cambio en el diseño, supondría desechar el inventario acumulado por la sobreproducción.

- **Causas.** Las causas de este despilfarro son los procesos poco fiables y falta de automatización, el empleo de un sistema *Push* en lugar de *Pull*, la fabricación anticipada por miedo a un paro en la producción, el elevado tiempo de cambio y preparación de herramientas y equipos, la respuesta a las previsiones y no a la demanda real y la falta de comunicación.
- **Acciones Lean.** Las principales acciones Lean para eliminar dichas causas son la estandarización de las operaciones, el establecimiento del sistema *Pull*, la producción de lotes pequeños y el cambio rápido de herramientas y utillaje (SMED).

▪ Despilfarros debido al sobreprocesamiento

Se debe evitar añadir más valor a un producto del que el cliente demanda, así como el consumo innecesario de recursos. Las operaciones agregadas al producto pueden ser resultado de procesos ineficientes que requieren repetir operaciones pero que no añaden valor al producto. El sobreprocesamiento conlleva aumento de costes, incremento del tiempo de fabricación, demoras en las entregas e insatisfacción del cliente.

- **Causas.** Las causas principales del exceso de procesos sobre un producto son la falta de estandarización de las acciones necesarias para llevar a cabo correctamente un proceso, el uso de útiles inadecuados y falta de motivación y espíritu de mejora.
- **Acciones Lean.** Para evitar este fallo se deben determinar correctamente las operaciones y pasos a seguir en la fabricación de cada producto, así como fomentar el espíritu mejora continua en todos los empleados.

▪ Despilfarros por exceso de existencias o stock

El exceso de materia prima, productos en fase de fabricación o productos finales almacenados es uno de los despilfarros más importantes, ya que supone un coste adicional por el valor del producto, el espacio utilizado, los transportes que exige, la manipulación para almacenarlo y recuperarlo, la gestión de existencias, así como costes por obsolescencia de los productos y deterioro de los materiales. El despilfarro por almacenamiento es el resultado de tener una mayor cantidad de existencias de las necesarias para satisfacer las necesidades más inmediatas.

- **Causas.** Las principales causas del exceso de existencias son previsiones de ventas erróneas, sobreproducción, tiempos de cambio de herramientas muy largos, cuellos de botella no identificados y procesos con poca capacidad.
- **Acciones Lean.** Para paliar dichas causas, se proponen: la implantación del sistema JIT de entrega de proveedores, la monitorización de tareas intermedias, la fabricación en células y la nivelación de la producción.

▪ Despilfarros por transporte y manipulación innecesarios.

El desperdicio por transporte es el movimiento innecesario de material de un punto a otro. Puede generar un aumento del Lead Time, ocupar tiempo de trabajo a los empleados de forma innecesaria, ocasionar riesgos de seguridad y daños en el material transportado.

- **Causas.** Las más frecuentes son la existencia de excesivos almacenes intermedios, re-procesos frecuentes, sobreproducción, gran tamaño de lotes y un layout obsoleto.
- **Acciones Lean.** Como acciones correctoras se proponen la reordenación de las instalaciones y un layout basado en células de fabricación para optimizar la disposición de los equipos y los trayectos de material. Las máquinas y las líneas de producción deben estar lo más cerca posible y los materiales deben fluir directamente de una estación a otra.

▪ Despilfarros por exceso de movimientos

El exceso de movimientos de personal está estrechamente ligado al despilfarro por transporte de material y tampoco añade valor al producto. Aumentan el tiempo de producción e incluso generan esperas innecesarias en el flujo productivo.

- **Causas.** Las causas fundamentales son un mal emplazamiento de herramientas y útiles, espacios de trabajos desorganizados, exceso de material que transportar y un incorrecto layout.
- **Acciones Lean.** Para prevenir este tipo de despilfarro se debe estudiar la distribución en planta más adecuada, analizar qué movimientos del personal podrían evitarse e implantar la metodología 5 S.

▪ Despilfarros debido a tiempos de espera

Es el tiempo perdido entre diferentes estaciones como resultado de una secuencia de trabajo, en la que una máquina o trabajador puede estar parado mientras otros están saturados. Las esperas paralizan la continuidad del flujo productivo, llevando asociadas paradas y reinicios de la maquinaria, suponiendo un retraso de los plazos de entrega.

- **Causas.** Estos tiempos de espera pueden aparecer por la falta de coordinación entre operarios, por falta de maquinaria apropiada, por elevados tiempos de cambio de herramientas, por la avería de maquinaria o por el retraso de alguna operación. Por otra parte, la automatización de algunas operaciones requiere igualmente la supervisión íntegra de un operario, que tampoco añade valor al producto, ya que el trabajo lo realiza la máquina.
- **Acciones Lean.** Como acciones correctoras se plantean el cambio rápido de herramientas (SMED), la formación polivalente de operarios, la automatización con una ligera supervisión humana (Jidoka) y el equilibrado de la línea.

▪ Despilfarros por errores, defectos y falta de calidad

Este tipo de despilfarro supone un reproceso o eliminación del producto por no cumplir los requisitos establecidos por el cliente, lo que supone la repetición de las actividades que aportaban valor al producto. Por ello, resulta evidente que el fallo deba detectarse lo antes posible, pues cuanto más tiempo se tarde en descubrir, mayores costes generará. Además debe evitarse que el producto erróneo llegue al cliente, ya que peligra el prestigio de la empresa y puede derivar en la pérdida del cliente.

Es importante aclarar que la palabra *defecto* no sólo hace referencia a la presencia de fallos visuales en el producto, sino también a la presencia de costes adicionales de calidad, eficiencia y disponibilidad de herramientas o equipos que suponen retrasos y paradas en la cadena de fabricación.

- **Causas.** Las causas de los errores en el producto final son la inadecuada formación de los operarios, la utilización de técnicas o utillajes inapropiados, los procesos productivos mal diseñados, la imprecisión en el diseño y los trabajos ineficientes de mantenimiento.

- **Acciones Lean.** Para evitar dichos errores se propone la estandarización de las operaciones, el control visual, el incremento de la fiabilidad de las máquinas, el empleo de mecanismos o sistemas antierror o Poka-Yoke y la automatización con una ligera supervisión humana.

Estos despilfarros constituyen los 7 desperdicios a eliminar en todo sistema productivo para formar un sistema eficaz, eficiente y comprometido con la mejora continua y la excelencia empresarial. La eliminación de estos desechos requiere la colaboración de todos los empleados, desde la alta dirección hasta los operarios de fábrica. El uso de las buenas prácticas, el cumplimiento de estándares y el desarrollo de habilidades del personal hacen posible la “limpieza” de estos 7 desperdicios. Por tanto, es evidente preguntarse qué pasaría si se desaprovechasen las habilidades de los trabajadores. La respuesta es la generación de un octavo desperdicio:

- **Despilfarros por mal uso de las competencias**

Este desperdicio consiste en desaprovechar las capacidades del personal, mermando su desarrollo profesional para realizar un trabajo determinado. Sin un plan de formación adecuado en materia de Lean Manufacturing, los empleados no serán capaces de entender la necesidad de cambio y mejora, por lo que tampoco estarán capacitados en la eliminación de los 7 desperdicios anteriores. Por otra parte, el mal uso de las competencias puede generar desmotivación, desaprovechamiento de recursos, e incluso puede derivar en accidentes laborales.

- **Causas.** Las principales causas son la falta de formación e información hacia los empleados y la falta de motivación y de atención a los mismos.
- **Acciones Lean.** Las acciones que propone la filosofía Lean son capacitar al empleado con la formación necesaria para cada puesto de trabajo y premiar la experiencia y la ausencia de incidentes y accidentes.

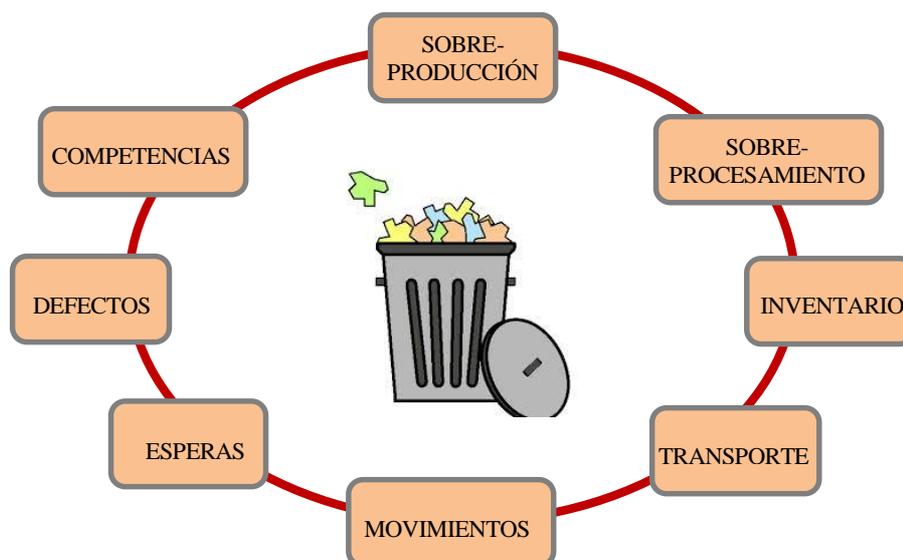


Figura 3. 18. Los 8 Desperdicios. Fuente: Elaboración propia.

Muda es el término japonés para designar los despilfarros. Para eliminar cualquier actividad o proceso innecesario es conveniente eliminar todo tipo de excesos e irregularidades, lo que se conoce como Muri y Mura, respectivamente.

Mura hace referencia a cualquier irregularidad, inconsistencia, incumplimiento o variación no prevista. Provoca el desequilibrio global de la producción, interfiriendo en el correcto funcionamiento de la misma. No obstante, puede evitarse con la implantación de numerosas herramientas Lean: sistema JIT, nivelación de la demanda o Heijunka, sistema Pull y estandarización.

Por su parte, *Muri* representa el exceso, la sobrecarga, el estrés y esfuerzo sobrado y redundante. Se considera Muri cuando varias personas realizan la misma tarea de manera distinta, generando duplicidad de trabajos, disconformidades y confusiones entre empleados y sobre los métodos de trabajo. Asimismo, se considera Muri cuando la demanda excede la capacidad de la producción y cuando las personas están sometidas a excesivo

estrés y elevadas cargas de trabajo. Todo ello conlleva tiempos de espera altos y cuellos de botella, además de insatisfacción y posibles problemas de salud. Esto puede evitarse mediante la estandarización de las operaciones, y la implantación de las metodologías 5 S, SMED, VPM y TPM.

3.5. Principios Lean

Una vez definida y detallada la estructura del “Templo Lean” resulta necesario definir los cinco principios básicos en los que se basa dicho “templo” y toda la filosofía Lean Manufacturing:

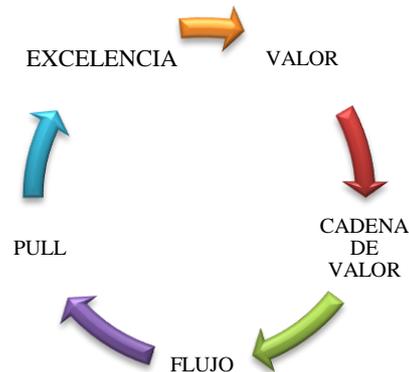


Figura 3. 19. Principios Lean. Fuente: Elaboración propia.

- **Especificar el valor**

Es importante aclarar qué se entiende por “valor” dentro de una cadena de producción para determinar qué procesos o actividades generan desperdicios. Se habla de “valor” cuando se hace referencia a cualquier producto o servicio, cualidad o característica del mismo que necesite o desee el cliente en el plazo, calidad y precio que esté dispuesto a pagar. Es necesario conocer lo que realmente demanda el cliente acerca del producto, qué valora y qué no, las características y cualidades a las que les da mayor valor y la calidad exigida en el instante de la entrega. Conocer dicha información es primordial para producir adecuadamente lo que el cliente espera de la empresa.

- **Identificar la cadena de valor**

La cadena de valor son todos aquellos procesos y actividades empleados para fabricar un producto, a lo largo del ciclo de vida del mismo. Una vez conocidas las preferencias y exigencias del cliente se deben evaluar todos los procesos y actividades involucrados en la fabricación del producto, y determinar cuáles de ellos aportan valor al producto y cuáles no.

Para identificar la cadena de valor se emplea la herramienta VSM, mediante la cual se pueden identificar los flujos de valor y de información. De esta manera, se podrá prescindir de aquellas actividades que no son necesarias o no añaden valor alguno, eliminando así los desperdicios.

- **Hacer que el valor fluya**

Identificada la cadena de valor, los procesos deben orientarse de tal forma que se mantenga un flujo continuo y regular de materiales y productos, descartando los movimientos y transportes innecesarios, así como la acumulación de stock y esperas de cualquier tipo. Para ello, los procesos se disponen en secuencia y muy próximos unos de otros y se hace uso de las herramientas Lean, como las 5 S, SMED, o la gestión visual. Es imprescindible conocer periódicamente el Takt Time de la producción para sincronizarla de acuerdo a la demanda del cliente y tener un control del tiempo de fabricación de cada producto.

El *Flujo Continuo pieza a pieza* u *OPF* (One Piece Flow, en inglés) se convierte en el estándar de fabricación, estableciendo secuencias de operaciones ininterrumpidas en la cadena de valor, reduciendo tiempos de espera y de fabricación y disminuyendo costes y desperdicios.

▪ *Sistema Pull desde el cliente*

Para reducir los tiempos de fabricación y las esperas de los materiales es importante mantener un sistema JIT en el que el Lead Time sea lo más pequeño posible. Si se tiene en cuenta lo que el cliente solicita en cada momento y se produce de acuerdo a su demanda, se tiene un sistema *Pull* con inventarios reducidos, lotes pequeños y rápida respuesta de producción. En este sistema la información fluye a lo largo de la cadena de producción en sentido inverso al flujo de materiales, ya que un equipo o puesto de trabajo no fabrica si el siguiente no da la orden.

Tradicionalmente la línea de producción se ha concebido como un sistema *Push* (empujar, en inglés), en el que cada estación de trabajo produce de forma constante sin atender a la demanda del cliente. Una estación fabrica lo que su capacidad le permite empujándolo después al proceso siguiente, donde se opera sobre el producto recibido, para luego empujarlo a la siguiente estación y así sucesivamente. Esta filosofía defiende la producción excesiva “por si acaso”. Por si acaso surgen problemas, por si acaso se produce una avería en una máquina y se paraliza la producción, por si acaso no se cuenta con el personal requerido, por si acaso ocurre un accidente, etc. Es una mentalidad preventiva a lo que puede ocurrir después y paralice la producción, por lo que algunas empresas aún se adhieren a esta filosofía. Sin embargo el sistema *Push* presenta muchos inconvenientes frente al sistema *Pull*:

- Aumenta el número de existencias almacenadas para hacer frente a posibles problemas, con el riesgo de quedar obsoletos e inutilizables.
- Se genera sobreproducción, fomentando la generación de desperdicios.
- Se producen situaciones de sobrecarga y cuellos de botella.
- Aumentan los costes asociados al transporte, manipulación, almacenamiento y control de material.
- Se forja un ambiente de estrés y presión en los trabajadores durante las fases finales de la producción, debido a la acumulación de trabajo por fabricar a una tasa inferior que los procesos anteriores.

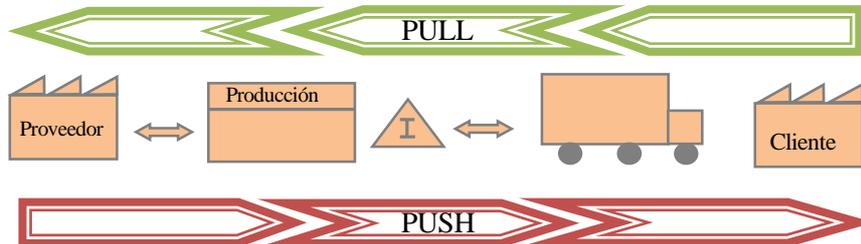


Figura 3. 22. Sistemas Push y Pull. Fuente: Elaboración propia.

Para evitar las desventajas del modelo tradicional es necesario la implantación de un sistema que produzca de acuerdo a la demanda mediante un flujo regular y continuo, que evite la generación de desperdicios y de costes innecesarios; es necesario un sistema Pull.

▪ *Perseguir la excelencia*

Todas las herramientas, técnicas y métodos de trabajo propuestos por Lean Manufacturing buscan la plena satisfacción del cliente mediante la calidad total del producto adquirido, de sus empleados y de la sociedad en general, para ser los mejores en el trabajo dentro de un amplio mercado competitivo. La búsqueda continua de la perfección en cada operación, actividad o proceso, desde la concepción del producto hasta su entrega al cliente es crucial para el logro de la excelencia empresarial. Dicha búsqueda requiere de la motivación y espíritu proactivo de todos los empleados, del saber hacer, analizar y solucionar problemas de forma individual y en grupo. Solo así se es capaz de encontrar aquello que se diferencie de los demás, y que el cliente esté dispuesto a pagar.

4 SITUACIÓN INCICIAL DE LA CÉLULA AUTÓNOMA DE FABRICACIÓN

Las máquinas deben trabajar. La gente debe pensar.

- Richard Hamming-

Autosuficiencia y automatización son los términos que mejor caracterizan a una célula autónoma de fabricación. En ella, las máquinas de control numérico no necesitan de la intervención de los operarios para la ejecución de las operaciones de mecanizado, debido a la programación de tareas y a la informatización de la información; éstos se limitan a tareas de mantenimiento, control y supervisión del trabajo en curso.

La aplicación directa de las herramientas Lean a un célula de fabricación autónoma puede ser la mejor manera de entender y poner en práctica los conceptos desarrollados en los capítulos anteriores. En este capítulo se va a describir dicha célula y sus principales características: productos a fabricar, tipo de maquinaria, distribución en planta de la célula, flujo de operaciones y tiempos de fabricación. Se va a evaluar la producción dentro de la célula y la necesidad y viabilidad de introducir e implantar ciertas técnicas o herramientas de la filosofía Lean para reducir desperdicios y mejorar algunos aspectos de la producción.

4.1. Punto de partida

La célula de fabricación, objeto de estudio, cuyas principales características son las comentadas en el capítulo 2 [subsección 2.3.1], está destinada a la producción de piezas mediante control numérico [subsección 2.4.2]. La célula cuenta con todos los elementos básicos necesarios para la producción completa de dichas piezas: máquinas, materiales, herramientas, útiles, almacenes, operarios, etc. La elección de las piezas a producir, del material empleado y del proceso de fabricación asociado, determina en gran medida el número de máquinas y operarios necesarios, así como los tiempos de fabricación y de entrega del producto final.

En esta sección se propone el estado inicial de la célula, el punto de partida que da comienzo a este trabajo y desde el que se van a tomar una serie de decisiones para caracterizar y determinar el funcionamiento de la misma. Este punto de partida viene definido por tres aspectos: tamaño de las piezas a producir, máquinas y almacenes.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el propósito de la célula es la fabricación completa de piezas mediante control numérico y de forma autónoma. El requisito a cumplir es que el tamaño o longitud mayor de las piezas sea inferior a 500 mm. El tamaño de las piezas determina también la envergadura de las máquinas, por lo que este requisito influirá en la disposición y el tamaño final de la célula.

Por otra parte, las máquinas de las que dispone la célula son: dos máquinas de CN, una para piezas inferiores a 1 metro y la otra para piezas inferiores a 2 metros; una máquina o centro de repaso y una máquina de limpieza, ambas para piezas inferiores a 2 metros; y una máquina de verificación. Cada máquina posee una capacidad de producción determinada, que dependerá en cada caso de los atributos de diseño y fabricación de las piezas

que se producen. Sin embargo, se establece una capacidad general que depende únicamente de la longitud mayor de las piezas. De esta forma, las capacidades de producción generales de las máquinas de la célula son las siguientes:

- Capacidad de 3 piezas/hora en una *máquina de CN* que mecaniza piezas cuya longitud mayor sea inferior a 2 metros.
- Capacidad de 4 piezas/hora en la otra *máquina de CN* que mecaniza piezas menores de 1 metro de longitud.
- Capacidad de 4 piezas/hora para piezas inferiores a 1 metro o de 2 piezas/hora, para piezas de hasta 2 metros, en la *máquina de repaso*.
- Capacidad de 6 piezas/hora en la *máquina de verificación*.
- Capacidad de 3 piezas/hora para piezas de hasta 2 metros en la *máquina de limpieza*.

No obstante, al fabricar piezas menores de 500 mm, el mecanizado de las mismas, por ejemplo, puede efectuarse empleando las dos máquinas de CN indistintamente y en la máquina de repaso pueden procesarse 4 piezas en una hora.

En cuanto al almacenamiento y recogida de material, próximos a la célula se sitúan tres grandes almacenes que abastecen de material y útiles a las máquinas, al mismo tiempo que recogen las piezas finales una vez concluido el proceso de fabricación. Los almacenes deben aprovisionar a la célula de tochos⁵ y útiles en todo momento para no causar retrasos en la fabricación, para lo cual deben contener la suficiente capacidad para hacer frente al ritmo de producción de la misma. Para ello, el *almacén de tochos* cuenta con 1000 huecos de 1 metro, mientras que el *almacén de útiles y herramientas* contiene 500 huecos de 1 metro y el *almacén de piezas* ya terminadas alberga 100 huecos de 1 metro.

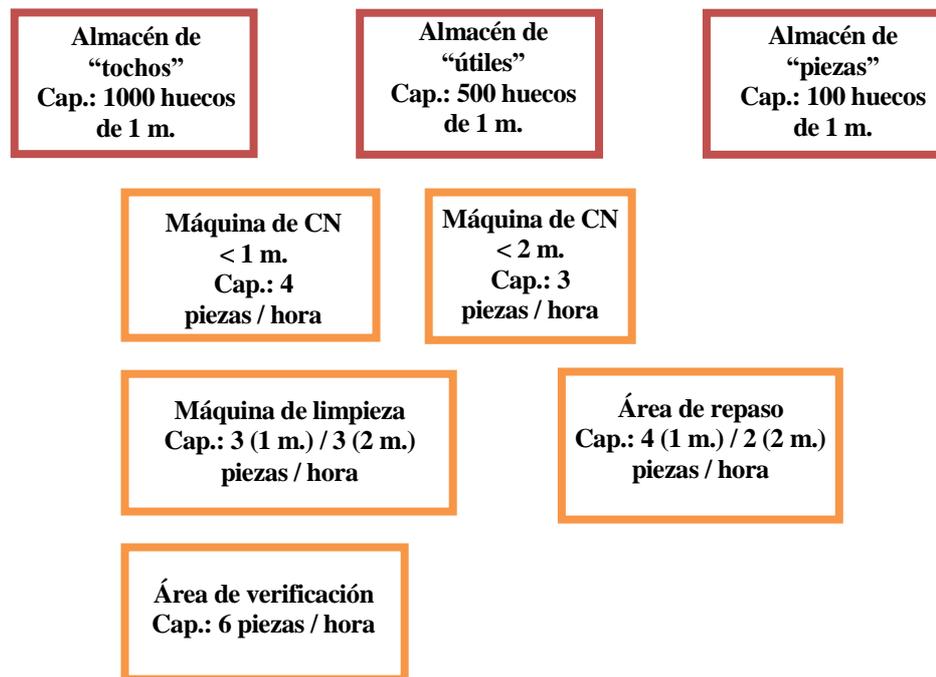


Figura 4. 1. Ilustración del punto de partida de la planta de fabricación, incluyendo las capacidades de máquinas y almacenes. Fuente: Elaboración propia.

⁵ Trozo de material en forma de ladrillo o prisma rectangular.

4.2. Decisiones: situación inicial

A partir de las primeras consideraciones tomadas en la sección anterior acerca de la maquinaria, los almacenes y las piezas, se pretende esclarecer la situación inicial de la célula a través de la determinación de sus principales características. La caracterización de la célula vendrá dada, por tanto, por las soluciones que el alumno da al planteamiento de preguntas acerca del tipo de piezas a fabricar, de las dimensiones de los almacenes, de la elección de máquinas, del tipo de layout, de la necesidad de operarios durante el proceso de fabricación, del tiempo de fabricación total, etc. A continuación se detallan cada una de las decisiones que se han ido tomando para definir cada uno de los aspectos de la célula y de la producción.

4.2.1. La célula “flexible lean”

Las células de fabricación son una de las herramientas Lean que permiten fabricar una variedad de productos con tan poco desperdicio como es posible. Tal y como se explica en el capítulo 3, la fabricación Lean es el modo de fabricar de manera rentable que hace a la empresa más competitiva, reduciendo costes y tiempos de fabricación, al mismo tiempo que dota de calidad a sus productos y procesos de fabricación.

Por otro lado, esta célula cuenta con máquinas de control numérico, por lo que la automatización y la autonomía están presentes en la ejecución de operaciones y en el cambio de herramientas en las máquinas. Las operaciones automáticas de mecanizado son controladas por un ordenador central situado fuera de la célula, así como su programación, lo que hace más fácil la modificación de cualquier aspecto del proceso de fabricación, resultando un sistema más flexible. Por ello, puede considerarse que la célula es una célula de fabricación flexible [subsección 2.5.2] aunque, en este caso, ésta contenga más de 3 máquinas, que como ya se comentó (en dicha subsección) no es condición excluyente para considerar un sistema de fabricación como célula flexible.

La *primera decisión* es considerar que la célula es, por tanto, una célula de fabricación flexible que reúne también las características “lean” de fabricación, como la reducción de desperdicios [sección 3.4] y la búsqueda de la mejora continua [apartado 3.2.3.11], de ahí la denominación de *célula “flexible lean”*.

4.2.2. Piezas a fabricar

Para establecer cualquier aspecto de la producción dentro de la célula, como las operaciones y el tiempo de fabricación, es imprescindible definir el tipo de piezas a fabricar, sus dimensiones y el tipo de material empleado, ya que de ello depende todo el proceso de fabricación.

La *segunda decisión* recae en la elección de las piezas que se han de producir dentro de la célula, del material a partir del cual se fabrican y los procesos de fabricación de las mismas. Con motivo de que este Trabajo Fin de Grado estuviese relacionado con la titulación a la pertenece, Grado en Ingeniería Aeroespacial, se ha querido relacionar éste con el ámbito de la industria y la producción aeroespacial. Es por ello que se ha decidido producir dos tipos de piezas de aluminio diferentes pertenecientes al fuselaje del avión C-295 de *Airbus Group*. La elección se ha realizado de manera que las piezas constituyan una familia de piezas [sección 2.2] en cuanto a la similitud en los procesos de fabricación, característica fundamental de las FMC.

Características de las piezas

Estas piezas, de pequeño tamaño, se ubican en la zona inferior de la sección 25 del fuselaje del C-295 y sirven de unión entre cuadernas y costillas. De esta forma, las dos piezas se ensamblan junto a otras piezas más pequeñas a la primera costilla de la parte inferior de la sección y a las primeras cuadernas laterales, por lo que cada sección contiene un par de piezas de cada tipo. Esto conlleva a producir exactamente el mismo número de piezas de cada tipo; por lo que se establece que, en la producción diaria, el 50 % de las piezas serán de tipo A y el 50 % restante, de tipo B.

Por otra parte, el material empleado en la fabricación de las piezas es el aluminio 2024, una aleación de aluminio y cobre, usado ampliamente en las alas y en el fuselaje de los aviones por su elevada solidez y resistencia a la fatiga.

Para diferenciar los tipos de piezas se les asigna una letra a cada uno, A o B, pasando a ser llamadas *piezas de tipo A* o *piezas de tipo B*, para más comodidad en la explicación del texto. Las figuras 4.2 y 4.3 muestran los tipos de piezas a fabricar y su unión en la sección del fuselaje del avión, respectivamente.

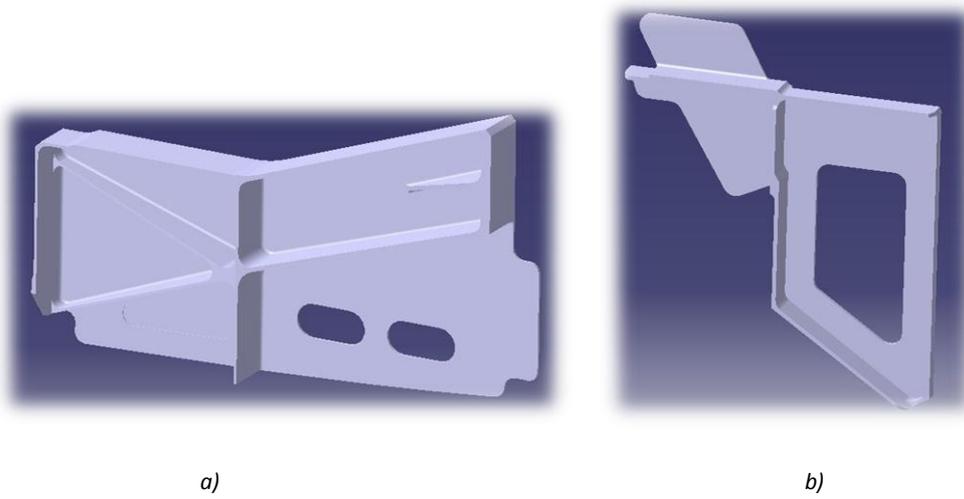


Figura 4. 2. Diseño mediante CATIA de las piezas a fabricar: a) pieza de tipo A, b) pieza de tipo B.
Fuente: Elaboración propia.

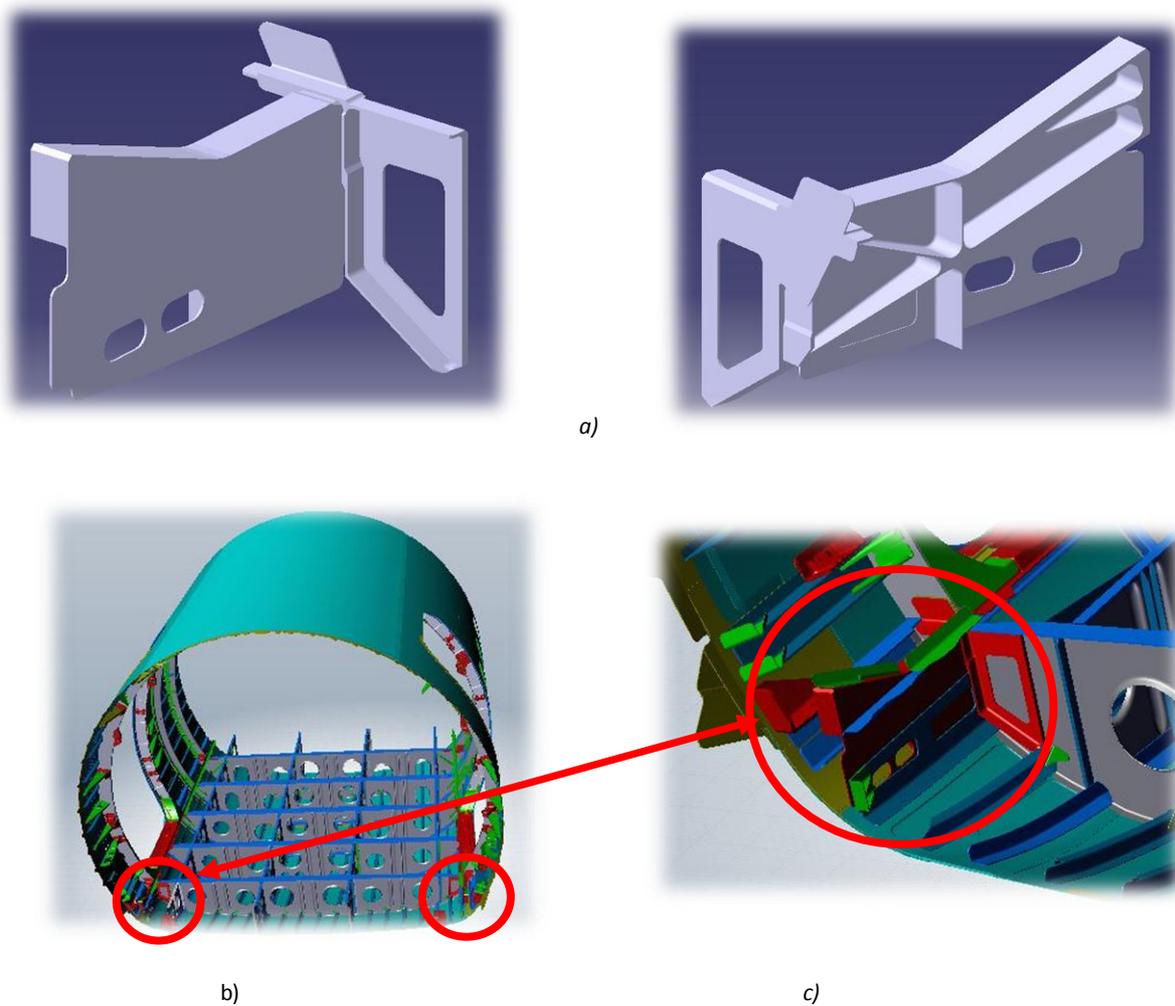


Figura 4. 3. Uniones de las piezas: a) distintas vistas de la unión de los dos tipos de piezas, b) localización de los dos pares de uniones en la sección de fuselaje, c) zoom de la unión con las cuadernas y otras piezas pequeñas.
Fuente: Elaboración propia.

Las piezas de tipo A y B no se asemejan demasiado en cuanto a geometría pero sus procesos de fabricación son muy similares, basándose en múltiples operaciones de fresado y desbaste. Pueden ser consideradas, por tanto, como una pequeña familia de piezas que comparten la mayoría de sus procesos de fabricación.

El diseño de las piezas se lleva a cabo mediante programación asistida por ordenador [subsección 2.4.3], CAD, con la que se puede visualizar el resultado final de las piezas antes de fabricarlas. De igual modo, la modificación en el diseño de las mismas puede realizarse de forma rápida y sencilla, en caso de ser necesario. Una vez fijado el diseño de las piezas, comienza la etapa de fabricación.

Para la fabricación de las piezas se parte de tochos de dimensiones mayores a la pieza final y mediante operaciones de mecanizado se va eliminando material hasta obtener el resultado deseado. Las principales operaciones que se les realiza a todas las piezas dentro de la célula son las siguientes:

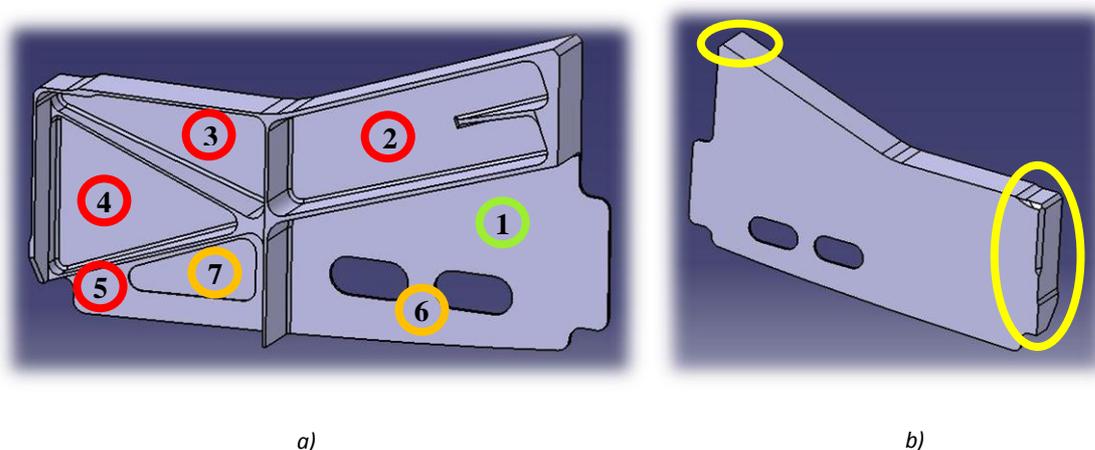
- Cajeadado o combinación de fresado frontal y periférico en el que la herramienta colocada en posición vertical se desplaza con una cierta profundidad a lo largo de la pieza de trabajo produciendo una cavidad.
- Fresado de careado para la eliminación de capas de material mediante fresado vertical.
- Orificios pasantes y ciegos no circulares mediante fresado.
- Desbaste y repaso de todas las superficies.
- Achaflanado o redondeo de aristas de las piezas.
- Verificación de dimensiones y perfecto alisado de las superficies.
- Limpieza de las piezas para eliminar los restos de virutas que pueden quedar tras el mecanizado.

No obstante, cada tipo de pieza tiene unas dimensiones determinadas, unos tiempos de fabricación establecidos y unos cambios de posición asociados. Por ello es conveniente contar con un plan de fabricación en el que se detalle toda la información necesaria para la producción de la familia de piezas.

Proceso de fabricación de piezas tipo A

Para la fabricación de las piezas de tipo A de dimensiones finales 360.6 x 216.85 x 35 mm se parte de tochos de aluminio de dimensiones 365 x 220 x 36 mm. Se comienza con un fresado de careado para eliminar material hasta una profundidad de 33.5 mm, como se muestra en figura 4.4 a) con el número 1. Seguidamente se realizan cuatro cajeados, mostrados en rojo en la misma figura: los cajeados 3, 4 y 5 se realizan con una profundidad de 33.5 mm, mientras que el cajeadado 2 tiene una profundidad de 32.5 mm. Posteriormente se practican los orificios ovalados y pasantes y el orificio triangular de 0.8 mm de profundidad mediante fresado frontal, identificados con los números 6 y 7 en la misma figura, respectivamente. Tras esto, las piezas se someten a un rectificado y repaso de todas sus superficies para conseguir la precisión dimensional requerida. Para finalizar las operaciones de mecanizado, se realizan los chaflanes en las aristas que lo requieran, rodeadas en amarillo en la figura 4.4 b), en un ángulo de 45° y con una longitud de 5.66 mm. Tras estos procesos de corte y desbaste las piezas pasan por una máquina de verificación donde se comprueba que el acabado dimensional y superficial sea el adecuado.

Las piezas que no cumplan estos requisitos serán desechadas, mientras que las que sí los cumplen se someten a un proceso de limpieza y eliminación de restos de virutas y otros contaminantes sólidos que pudieran quedar adheridos durante la fabricación.



a) b)
Figura 4. 4. Secuencia de operaciones de fabricación de piezas de tipo A:
a) operaciones de fresado, b) achaflanados. Fuente: Elaboración propia.

Proceso de fabricación de piezas tipo B

Por otra parte, las piezas de tipo B inician su fabricación a partir de tochos de aluminio de dimensiones 232 x 205 x 22.5 mm. En estas piezas se realizan fundamentalmente dos cajeados principales y un fresado de careado. Se comienza por el cajeadado 1, mostrado en la figura 4.5 a), con una profundidad de 19.5 mm. Seguidamente se realiza el cajeadado 2 con una profundidad de 20.5 mm. El fresado de careado, mostrado en la figura con el número 3, se realiza hasta llegar a la profundidad de 20.5 mm. Estas piezas cuentan con un solo orificio pasante realizado mediante fresado de careado, cuya forma es la mostrada con el número 4 en la misma figura. Tras el fresado, las piezas se someten a un rectificado de varios milímetros en todas las superficies hasta llegar a las dimensiones deseadas de 229.4 x 202.35 x 21.5 mm. Por último, se realizan los chaflanes de la misma forma que en las piezas de tipo A: en ángulos de 45° y con un longitud de 5.66 mm. Los chaflanes se realizan en las aristas rodeadas de amarillo en la figura 4.5 b). De igual modo que las piezas de tipo A, las piezas de tipo B se someten a un proceso de verificación y limpieza tras las operaciones de mecanizado.

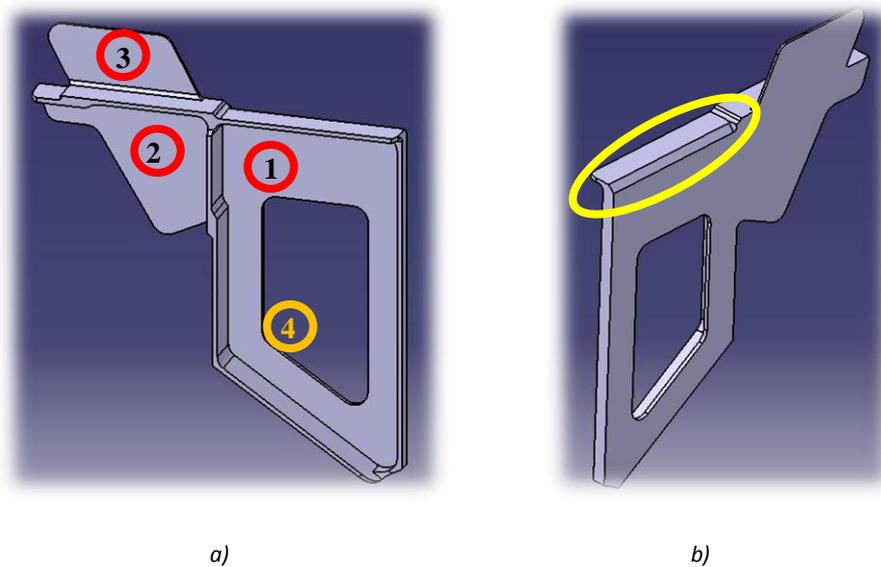


Figura 4. 5. Secuencia de operaciones de fabricación de piezas de tipo B: a) operaciones de fresado, b) achaflanados. Fuente: Elaboración propia.

Una célula se diseña con el fin de asegurar la producción completa o parcial de la familia de piezas a fabricar, por lo que es imprescindible que cuente con todas las máquinas necesarias para ello.

4.2.3. Maquinaria

Con los procesos de fabricación definidos para ambos tipos de piezas resulta más fácil la elección de las máquinas que constituyen la célula. La **tercera decisión** consiste, por tanto, en seleccionar las máquinas más adecuadas para la producción de las piezas atendiendo a los procesos de fabricación de las mismas. A continuación se detallan las características de cada máquina y el porqué de su elección.

- **Máquinas de mecanizado de control numérico**

Como se ha visto en la subsección anterior el mecanizado de las piezas consiste mayormente en operaciones de fresado y desbaste. Es por esta razón, por la que se decide que las máquinas de control numérico encargadas del mecanizado de las piezas, mostradas en la figura 4.1, sean dos fresadoras de CN, ambas de similares características. Puesto que la célula cuenta con dos fresadoras autónomas y se desea fabricar dos tipos de piezas de una misma familia, se decide que la fresadora cuya capacidad es de 3 piezas/hora realice íntegramente las operaciones de corte y fresado de las piezas de tipo A, mientras que las piezas de tipo B sean fresadas únicamente por la fresadora de capacidad 4 piezas/hora. De esta forma se consigue que el fresado de ambos tipos de piezas se realice de forma simultánea, lo que a priori contribuye a la reducción del tiempo de fabricación. Resulta evidente que el proceso de fabricación de las piezas de tipo A es algo

más complejo que el de las piezas de tipo B, por lo que compresiblemente la capacidad de producción de la fresadora de piezas tipo A, es menor que la de la otra fresadora. A partir de este momento, la fresadora de piezas tipo A se le va a denominar *fresadora 1* y a la de piezas de tipo B, *fresadora 2*, para más comodidad en la explicación.

Por tanto, las fresadoras realizan las operaciones de corte de las piezas. El tocho de material inicial es conformado mediante procesos de arranque de viruta. Las operaciones realizadas en la familia de piezas se realizan mediante fresado de careado o refrentado y fresado combinado, éste último para producir cavidades. En el fresado de careado, la herramienta de corte se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. La herramienta de corte posee dientes afilados que remueven material de la superficie. En el fresado combinado o cajeado la herramienta de corte arranca viruta en dirección perpendicular y horizontal al eje de rotación, con la base y el perímetro de la herramienta. Estos procesos de mecanizado por arranque de viruta requieren el empleo de fluidos de corte que se aplican en la zona de formación de la viruta para lubricar o refrigerar el material durante el proceso de corte, ya que el mecanizado a altas velocidades conlleva una gran fricción y calentamiento entre el material y la herramienta.



Figura 4. 6. a) Ejemplo de fresadora vertical careada de control numérico y b) fresado con refrigeración. Fuente: www.int.haascnc.com

Las fresadoras de la célula son máquinas verticales de 3 ejes y monohusillo, por lo que pueden mecanizar las piezas siguiendo los tres ejes coordenados mediante una herramienta, que irá cambiando según el proceso a realizar. Constan principalmente de una mesa de trabajo, un carro que soporta la mesa, un codo que soporta el carro y da movimiento vertical a la mesa, un cabezal donde se ubica el husillo y un tablero de control, mediante el que se controla la máquina. Todo ello se emplaza en una estructura careada que protege a la máquina y aísla el proceso de contaminantes del entorno. Para la lubricación y la refrigeración del proceso de corte entre las piezas y las herramientas se emplea la taladrina como fluido de corte, una mezcla compuesta de agua y aceites.

Una vez finalizada la fase de fresado, las piezas se llevan al área de repaso donde se llevará a cabo un proceso de acabado superficial de las piezas.

▪ **Máquina de Repaso de control numérico**

Para el acabado final de la pieza se decide emplear una rectificadora de control numérico que, mediante un mecanizado abrasivo, consiga la precisión dimensional adecuada. Mediante el uso de abrasivos, pequeñas partículas duras con aristas afiladas y forma irregular, se consigue remover pequeñas cantidades de material de la superficie, produciendo virutas diminutas. Como herramienta de rectificado se emplea un disco abrasivo.

En la célula se dispone de una rectificadora de husillo horizontal para rectificado plano. La pieza se asegura en un plato magnético sujeto a la mesa de trabajo de la rectificadora y el disco abrasivo se monta en el husillo horizontal. Al igual que las fresadoras, la rectificadora posee una estructura careada y un panel de control para programar las operaciones de repaso mediante control numérico.



Figura 4. 7. Ejemplo de rectificadora de control numérico.
Fuente: www.interempresas.net

El rectificado constituye el paso final del mecanizado de las piezas y es de gran importancia para eliminar restos de virutas y obtener el acabado superficial deseado.

▪ **Máquina de Verificación de control numérico**

La verificación consiste en la comprobación de que la pieza se ha fabricado de acuerdo con el diseño planificado y que reúne todos los requisitos de calidad. Para poder comprobar la precisión de las piezas se decide integrar en la célula una máquina de medición de coordenadas de control numérico, que consiste en una plataforma en la que se coloca la pieza a medir y después se mueve en forma lineal o se gira. Un puntero o palpador sujeto a una cabeza realiza movimientos tridimensionales y registra todas las mediciones mediante un software de control. Esta máquina es muy versátil y es capaz de registrar mediciones de perfiles complejos con alta resolución y a gran velocidad.



Figura 4. 8. Ejemplo de máquina de medición de coordenadas de control numérico. Fuente: www.Industic.es.

Por otra parte, cada año las máquinas de mecanizado de la célula reciben una calibración adecuada según la operación de mecanizado a realizar, para evitar errores en el mecanizado y evitar desechar piezas defectuosas.

▪ **Máquina de Limpieza**

La limpieza consiste en el desprendimiento o separación de contaminantes sólidos y líquidos de una superficie y es una parte importante de las operaciones de manufactura, ya que resulta fundamental para una aplicación más efectiva de recubrimientos, pintura, uniones con adhesivos, soldadura y otros procesos de ensamblaje. El tipo de proceso de limpieza depende del tipo de residuos de fluidos y contaminantes a retirar. Los contaminantes pueden consistir en herrumbre, cascarillas, virutas, fluidos de corte, lubricantes sólidos, pigmentos y elementos ambientales en general. Para eliminarlos se puede emplear limpieza mecánica, electrolítica o química.

Para esta célula se decide disponer de una máquina manual de limpieza química para retirar las virutas, la suciedad y la taladrina empleados durante el mecanizado. El proceso de limpieza se lleva a cabo mediante lotes de piezas, que se introducen manualmente en la máquina junto a una solución de limpieza que reacciona con los contaminantes. Tras un tiempo, éstos quedan suspendidos en la solución y la pieza queda limpia de contaminantes.

La limpieza química es la más adecuada para eliminar aceites de lubricantes y refrigerantes empleados en las máquinas de mecanizado.



Figura 4. 9. Ejemplo de máquina de limpieza manual.
Fuente: www.directindustry.es.

4.2.4. Almacenes

Los almacenes no forman parte de la célula en sí, sino que se encuentran situados en un área destinada a la recogida, almacenamiento y aprovisionamiento de todo tipo de elementos para la fabricación. Dicho área debe localizarse lo más próximo posible a la célula para minimizar los desplazamientos y el tiempo no productivo empleado en transportes.

Como ya se comentó en la sección 4.1, la célula cuenta con tres almacenes para guardar los tochos de material, los útiles, las herramientas y las piezas una vez acabadas. Cada almacén constituye un espacio físico en el que una o varias estanterías, cajoneras y otras estructuras de almacenamiento recogen una cantidad determinada de material o herramientas. Dependiendo de la capacidad de la que disponga cada uno, de la facilidad y rapidez al acceso que se desee y de la disponibilidad de espacio que se tenga en dicho área, los almacenes pueden tener distintas dimensiones.

La *cuarta decisión* a tomar está relacionada con las dimensiones de los almacenes, con el espacio entre los mismos y con la mejor forma de almacenamiento de los distintos elementos. En el diseño de los almacenes se busca que el acceso a los materiales sea fácil y rápido, sin necesidad de emplear elevadores para llegar a los últimos compartimentos. Esto implica que el conjunto de sistemas de almacenamiento ocupa más espacio en la planta que si se emplearan otros más altos y más estrechos; sin embargo, se dispone de suficiente espacio para albergar los almacenes, pues a priori no se tienen restricciones acerca del espacio total de la planta de fabricación. Por ello, se establece una solución de compromiso entre la longitud, la altura y los huecos que debe contener cada almacén, de modo que se garantice la llegada y salida de materiales y útiles de forma rápida sin interrupciones por huecos poco accesibles. La estructura y dimensiones de los almacenes y de sus respectivos compartimentos se detallan a continuación.

▪ Almacén de tochos

El almacén donde se depositan los tochos con los que se inicia la fabricación cuenta con 1000 huecos de 1 metro. Debido a su gran capacidad, este almacén se divide en dos grandes sistemas de cajones telescópicos de 500 huecos cada uno, distribuidos en 20 filas y 25 columnas. Las dimensiones de ambas cajoneras son 8020 x 1830 x 1040 mm. La decisión de dividir este almacén en dos es debido a que no resulta factible contar con un sólo almacén de aproximadamente 16 metros de longitud, pues aumentaría el número y la distancia de los desplazamientos entre éste y la célula. Al disponer de dos cajoneras independientes, éstas pueden situarse enfrentadas de forma que ocupan la mitad de espacio en longitud que teniendo una sola.

Los cajones poseen unas dimensiones de 1000 x 300 x 80 mm, espacio suficiente para albergar los tochos de ambos tipos de piezas, cuyos espesores no superan los 36 mm y el ancho de los mismos es igual o inferior a 220 mm.

Para mayor comodidad, se decide emplear una cajonera para albergar los tochos de cada tipo de pieza. De esta manera, no se desaprovecha el tiempo buscando el tipo de tocho necesitado en ambas estructuras.

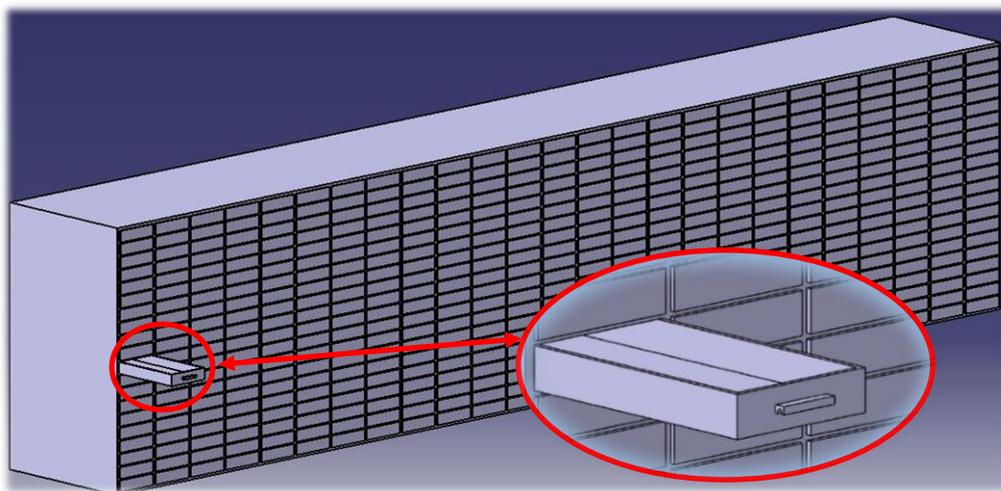


Figura 4. 10. Sistema de cajones telescópicos para el almacenamiento de tochos. Fuente: Elaboración propia.

- **Almacén de útiles**

El segundo almacén contiene todos los útiles, herramientas y utillajes necesarios para la realización de todas las operaciones de fabricación. Al igual que el almacén de tochos y por las mismas razones, consta de dos estantes de amplios cajones donde se depositan ordenadamente los útiles por tamaño y orden de utilización. Cada uno posee una capacidad de 250 huecos de 1 metro y sus dimensiones son 8020 x 1830 x 1040 mm, las mismas que las cajoneras de tochos. Sin embargo, los cajones para guardar los útiles son más profundos para albergar herramientas y útiles que puedan ser más voluminosos. Están distribuidos en 10 filas y 25 columnas y las dimensiones de cada cajón son 1000 x 300 x 170 mm.

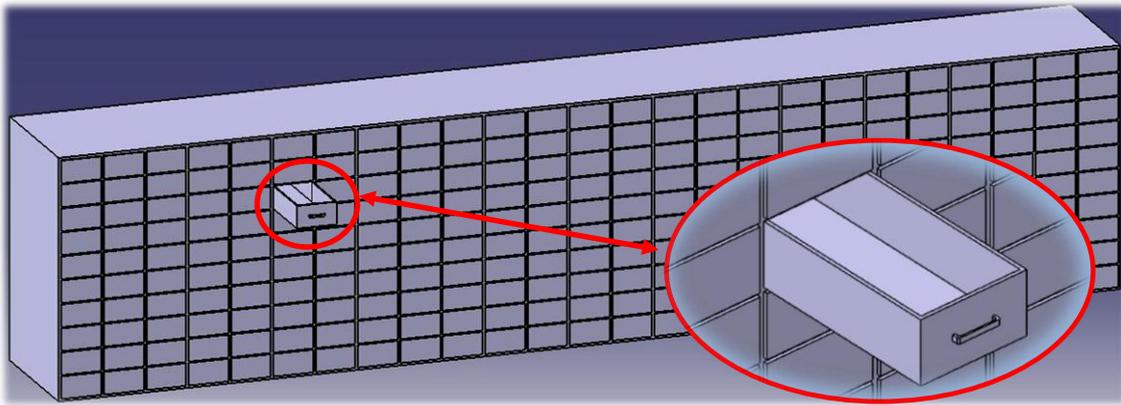


Figura 4. 11. Sistema de cajones telescópicos para el almacenamiento de útiles. Fuente: Elaboración propia.

- **Almacén de piezas fabricadas**

Por último el almacén que guarda las piezas terminadas tras su paso por el área de limpieza cuenta con dos estanterías de 10 grandes bandejas correderas cada una, donde se depositan dichas piezas. Cada bandeja se divide en 5 huecos de 1 metro, habiendo un total de 50 huecos en cada estantería. Las dimensiones de las estanterías son 1740 x 1660 x 1040 mm; las de cada bandeja, 1620 x 1000 x 60 mm; y las de cada hueco, 1000 x 300 x 50 mm. Puede observarse que la longitud de estas estanterías es muy inferior a las cajoneras de los anteriores almacenes, por lo que se podría haber empleado una sola estantería de mayor longitud. Sin embargo, se ha preferido dotar al área de almacenamiento de homogeneidad, colocando dos estructuras enfrentadas por almacén, tal y como se muestra en la figura 4.18, y destinando a cada una el almacenamiento de un solo tipo de pieza, tal y como se decidió hacer con los almacenes de tochos.

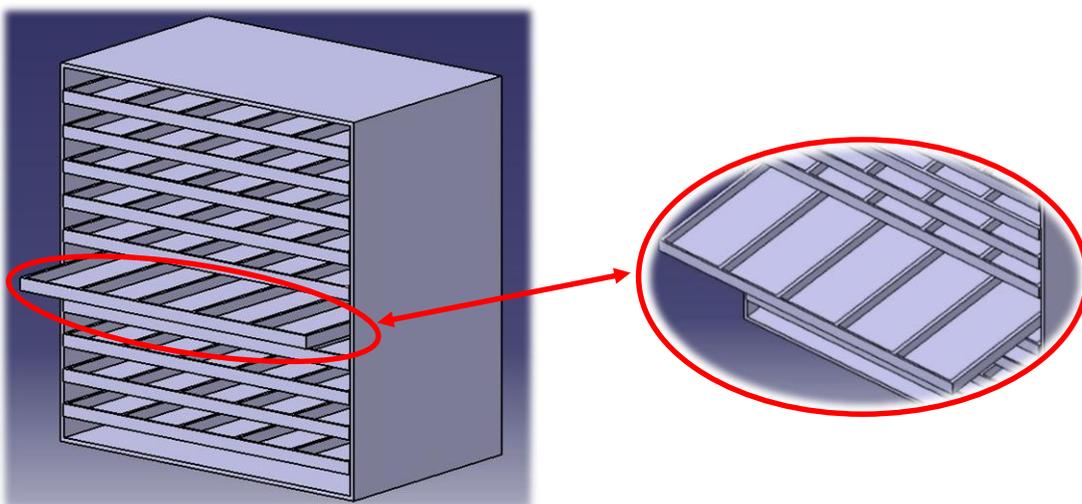


Figura 4. 12. Estantería de bandejas correderas para el almacenamiento de piezas terminadas. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la forma de almacenamiento de los distintos elementos en cualquier estructura, se establece que la mejor manera de hacerlo es ir rellenando los cajones y bandejas de izquierda a derecha y de abajo a arriba, para proporcionar estabilidad a la estructura. Por la misma razón, cuando se deban trasladar los tochos y los útiles a la célula, los cajones se vacían de derecha a izquierda y de arriba a abajo.

Hasta el momento se han descrito y detallado las principales características y dimensiones de los almacenes que se tienen dentro de la planta de fabricación como punto de partida. Sin embargo, en el proceso de fabricación se hace necesario disponer de otros sistemas de almacenamiento para guardar los medios de transportes de materiales y para el aprovisionamiento de la célula. Por esta razón, aparte de los almacenes anteriores, se decide tener los siguientes espacios o sistemas de almacenamiento.

▪ **Almacenes intermedios**

Para garantizar la autonomía de la célula durante un determinado tiempo se dispone de pequeños almacenes intermedios donde puedan colocarse los materiales a la entrada y salida de la célula, así como tras algunas máquinas donde las piezas deban esperar para ser procesadas. Se decide entonces colocar a pie de máquina sencillos estantes de 1.1 metros de altura, que constan de cuatro baldas de dimensiones 1000 x 500 x 30 mm y separadas entre sí 300 mm. De esta forma, se tienen cinco estantes intermedios: el primero, a la entrada de la célula donde se apilan los tochos de material; el segundo, tras la segunda fresadora, para aprovisionar a las máquinas de las distintas herramientas y útiles; el tercero junto a la máquina de medición de coordenadas, donde se colocan las piezas desechadas por no cumplir con los requisitos de diseño durante la verificación; el cuarto, justo antes de la máquina de limpieza, donde se ubican las piezas que ya han sido verificadas y que esperan a ser introducidas en la máquina de limpieza por lotes; y el quinto, tras la máquina de limpieza, donde se colocan las piezas terminadas a la espera de ser transportadas al almacén de piezas.

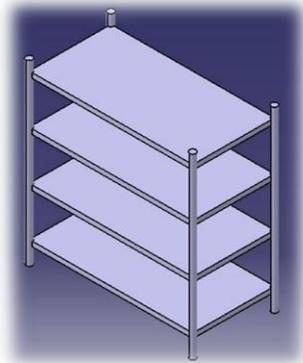


Figura 4. 13. Estantes intermedios. Fuente: Elaboración propia.

▪ **Cuba de desechos**

Durante el proceso de verificación, la máquina de medición de coordenadas desecha aquellas piezas que no cumplan con los requisitos dimensionales de diseño o los requisitos de calidad y acabado superficial deseados. Por ello, es necesario disponer de una cuba en la que depositar todas las piezas que no superen el proceso de verificación. En ella, además, pueden arrojarse los recortes de material y virutas procedentes de los procesos de fresado y rectificado. Sus dimensiones son de 4000 x 2000 x 1000 mm.

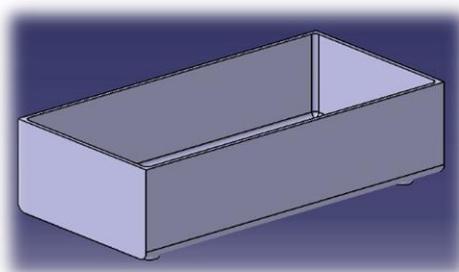


Figura 4. 14. Cuba de desechos para piezas no conformes. Fuente: Elaboración propia.

▪ **Almacén de transportes manuales de materiales**

Para el transporte de tochos, útiles, piezas, residuos y otros materiales por la planta de fabricación se va a hacer uso de carretillas y transpaletas manuales, para evitar que el operario cargue con demasiado peso y para facilitar y agilizar el transporte de dichos materiales. Durante el tiempo que no estén en uso, los sistemas de transporte deben quedar recogidos en un espacio donde no interfieran en el flujo normal de personas y materiales. Este espacio, delimitado por marcas en el suelo de la planta, se sitúa junto a los almacenes exteriores a la célula y cuenta con unas dimensiones de 4500 x 3000 mm, espacio suficiente para albergar dos carretillas manuales y dos transpaletas como las de la figura 4.15. Las carretillas son usadas para todos los transportes de materiales entre célula y almacenes, mientras que las transpaletas se emplean durante la recepción y transporte de tochos comprados a su almacén.



Figura 4. 15. Transportes manuales usados en la planta de fabricación: a) carretilla, b) transpaleta.
Fuentes: www.logismarket.es y www.magliner.es

4.2.5. Layout

Una célula de fabricación se diseña acorde al tipo de producto a fabricar y a su proceso de obtención. Es necesario estudiar la secuencia de las operaciones, el tiempo de fabricación de cada producto y los movimientos entre las diferentes estaciones de trabajo de modo que se garantice la máxima reducción de desperdicios. Para ello, es necesario establecer correctamente un layout atendiendo a los materiales, a la maquinaria e instalaciones, mano de obra, movimientos y esperas de productos dentro de la célula, y que sea capaz de lograr los siguientes objetivos:

- **Unidad** e integración de todos los elementos implicados en el sistema productivo.
- **Circulación mínima** de materiales y personas.
- **Seguridad** y confort del personal en el ámbito de trabajo.
- **Flexibilidad** para adaptarse a los cambios de las diferentes circunstancias.
- **Costes mínimos** derivados de la inversión de equipos y tiempo de producción total.
- **Fiabilidad** del sistema y del mantenimiento, teniendo en cuenta la tasa de desgaste de la maquinaria.

Un layout adecuado aumenta la productividad del sistema, al mismo tiempo que disminuye los desperdicios por desplazamientos, sobreproducción, inventarios y esperas.

La **quinta decisión** tomada sobre la situación inicial de la célula consiste, por tanto, en la justificación de la secuencia de las operaciones de fabricación que se propuso en la subsección 4.2.2 y que se muestra en la figura 4.16, y en la disposición de las máquinas dentro de la célula y de los almacenes exteriores a ella atendiendo a dicha secuencia. Asimismo, se definen los flujos de material y los desplazamientos de cada tipo de pieza por la planta durante el proceso de fabricación.

Diagrama de procesos

La secuencia de operaciones viene determinada por el proceso de fabricación de cada tipo de pieza. Como se ha comentado anteriormente, la fabricación de las piezas es un proceso más o menos sencillo en el que cada pieza es sometida a cuatro operaciones principales: fresado, rectificado, verificación y limpieza.

Resulta evidente pensar que la primera operación debe ser la de corte y fresado de los tochos, seguido del rectificado de las superficies que lo requieran para un acabado que cumpla con los requerimientos de diseño. La duda recae en el orden de las dos operaciones restantes. Podría pensarse que resultaría más conveniente realizar la limpieza de las piezas que llegan manchadas de los fluidos de corte del mecanizado, antes de introducir las en la máquina de verificación y así evitar que los útiles y herramientas de esta máquina se ensucien también. Sin embargo, siguiendo con este razonamiento cabría preguntarse lo siguiente: ¿Es eficiente limpiar una pieza antes de comprobar si tiene algún defecto en la máquina de verificación? La respuesta es obvia: si se limpia una pieza que luego se cataloga como defectuosa, se incurre en desperdicios de esperas y sobreprocesamiento. Por todo ello, se decide situar la máquina de medición de coordenadas antes de la limpieza, constituyendo esta última la operación final.

En la figura 4.16 se ilustra el diagrama de operaciones durante el proceso de fabricación desde la recepción del material hasta el almacenamiento de las piezas en su almacén.

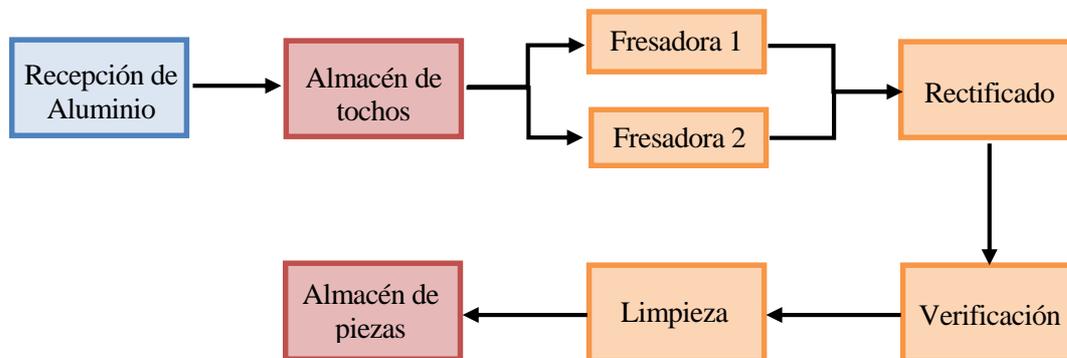


Figura 4. 16. Diagrama de flujo de la secuencia de operaciones durante la fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Layout

La primera cuestión referente al layout de la planta de producción es la disposición de las máquinas dentro de la célula. Como es sabido [apartado 2.3.1.3], una célula de fabricación puede tener forma de U, de C, de línea recta, en bucle o rectangular, dependiendo del número de máquinas y de si la manipulación de material se hace de forma manual o automática. Por otra parte, la disposición más empleada en las células de fabricación flexible es la distribución en forma de U, que minimiza el espacio ocupado por la célula en la planta y los desplazamientos de los operarios dentro de la misma. Además, dentro de la filosofía Lean esta disposición es la más adecuada para reducir los desperdicios que puedan producirse durante la fabricación. Por lo tanto, se decide emplear un layout en forma de U, que a priori resulta el más idóneo para esta célula.

Tras la determinación del tipo de célula es necesario ubicarla, junto a los almacenes exteriores a ella, dentro de la planta de fabricación. Inicialmente no existen restricciones de espacio, sin embargo, es conveniente minimizar el área ocupada por la célula, así como su distancia a los almacenes, sea cual sea el espacio total disponible. De esta forma se reducen los desplazamientos y el tiempo dedicado a ello, el cuál influye en el tiempo final de entrega del producto.

En la siguiente figura se muestra la distribución general dentro de la planta, de la que se hace uso, a continuación, para detallar las decisiones tomadas sobre el layout global.

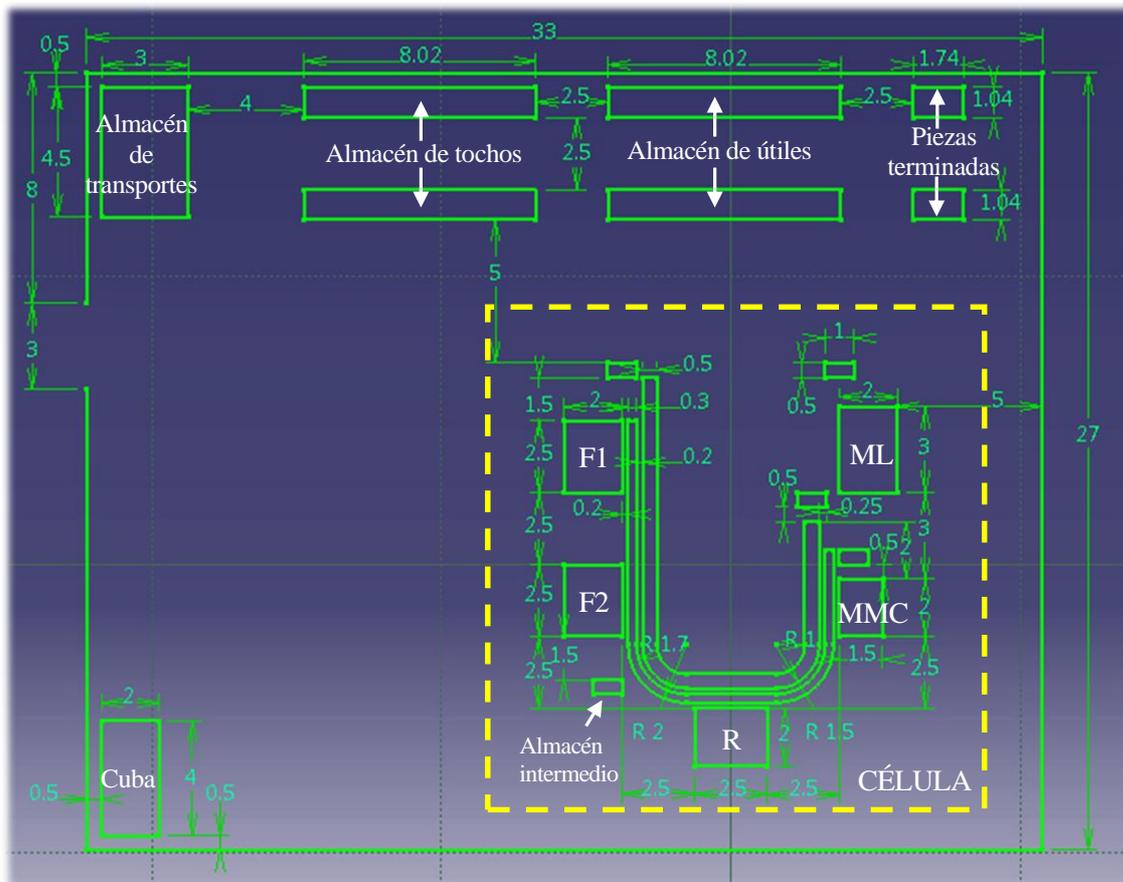


Figura 4. 17. Layout general de la planta de fabricación con las medidas principales (en metros). F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

▪ Planta de fabricación

La planta de fabricación es el espacio donde se llevan a cabo todas las operaciones relacionadas con la producción completa de las piezas, desde la recepción de material hasta el almacenamiento del producto acabado. Este espacio suele delimitarse mediante paredes o muros para separar diferentes plantas de producción dentro de una fábrica o una sola planta del exterior. Cuenta con una superficie de $33 \times 27 \text{ m}^2$, donde se encuentran todos los almacenes y la propia célula de fabricación. La entrada a la planta se realiza a través de una puerta de 3 metros de longitud ubicada en la pared derecha de la misma.

▪ Almacenes externos a la célula

La localización de los almacenes de tochos, útiles y piezas, del almacén de transportes manuales y de la cuba de desechos dentro de la planta de fabricación debe garantizar el suficiente espacio entre éstos y la célula para facilitar los desplazamientos y evitar interrupciones en el proceso de fabricación. Se decide, por tanto, situar los almacenes exteriores muy próximos a una de las paredes, a 0.5 metros de la misma; de esta forma, se maximiza el espacio disponible para situar la célula dentro de la planta. La situación de cada uno de ellos es la siguiente:

- Almacén de transportes manuales. Constituye un espacio en la planta de $4.5 \times 3 \text{ m}^2$ y se encuentra delimitado por marcas en el suelo, ya que no cuenta con una estructura o almacén físico que separe los sistemas de transporte del resto de la planta. Este espacio se sitúa en la esquina superior izquierda de la planta, a 0.5 metros de las paredes y a 3 metros de la entrada a la planta.
- Almacén de tochos. Se sitúa a 4 metros del almacén de transportes y ocupa un espacio total de $8.02 \times 4.58 \text{ m}^2$ en el que se sitúan las dos cajoneras enfrentadas. Cada una ocupa un área de $8.02 \times 1.04 \text{ m}^2$ y entre ellas existe un espacio de 2.5 metros hacia el que se despliegan los cajones de un metro de longitud. Esta distancia constituye un espacio suficiente para que el operario pueda abrir los cajones de ambos almacenes y éstos queden desplegados simultáneamente.

- Almacén de útiles. Este almacén tiene la misma disposición en planta que el almacén de tochos, del que se encuentra separado 2.5 metros, por lo que ocupa el mismo espacio que el anterior y existe la misma distancia entre cajoneras.
- Almacén de piezas. Separado también 2.5 metros del de útiles, este almacén ocupa un espacio de $4.58 \times 1.74 \text{ m}^2$, y está formado por dos estanterías de bandejas correderas que toman $1.74 \times 1.04 \text{ m}^2$ cada una de dicho espacio. Las estanterías se sitúan enfrentadas, al igual que los almacenes anteriores, y separadas 2.5 metros para que las bandejas de ambas, de 1 metro de longitud, puedan desplegarse simultáneamente, si fuera necesario, al mismo tiempo que un operario pueda situarse en medio de ellas. Por último, el almacén se separa 2.72 metros de la pared derecha.

Estos cuatro almacenes se sitúan a 0.5 metros de la pared superior y juntos ocupan aproximadamente $29.78 \times 4.58 \text{ m}^2$, como se muestra en la figura 4.18 (área delimitada por la línea discontinua naranja). Esta superficie de aproximadamente 136.4 m^2 supone alrededor del 15 % de la superficie total de la planta, que cuenta con 891 m^2 . Por otra parte, para la separación de los almacenes de tochos, útiles y piezas se ha considerado que la distancia de 2.5 metros es la idónea para permitir el paso de personas y el transporte de materiales desde o hacia la célula, sin que deba disponerse de una mayor superficie para la planta de fabricación. Para la separación del almacenamiento de transportes de los demás almacenes se ha decidido contar con una distancia de 4 metros, para que, durante la recepción de los tochos de aluminio, éstos puedan ser transportados cómodamente mediante las transpaletas manuales hasta el almacén de tochos.

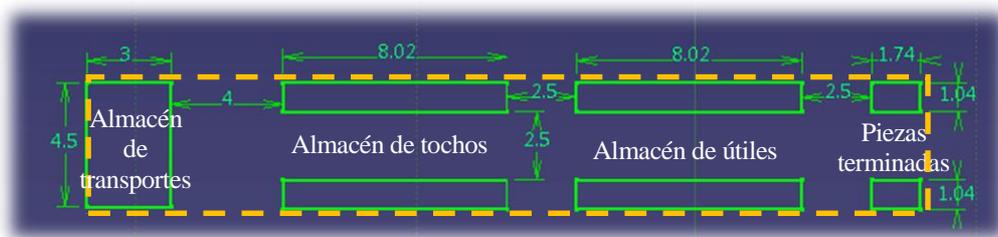


Figura 4. 18. Distribución en planta del área de almacenamiento externo superior. Medidas expresadas en metros. Fuente: Elaboración propia.

- Cuba de desechos. La cuba donde se depositan las piezas no conformes y los restos de aluminio procedentes de los procesos de mecanizado, comprende un área de $4 \times 2 \text{ m}^2$. A diferencia de los anteriores, este sistema de almacenamiento se sitúa en la esquina inferior izquierda de la planta, a 0.5 metros de las paredes, para que se encuentre cerca de la célula al mismo tiempo que se sitúa próxima a la entrada a la planta, para facilitar el transporte de su contenido en el momento del vaciado.

▪ Célula

Como ya se ha ido comentando a lo largo del capítulo, la célula de fabricación cuenta con cinco máquinas y cinco estantes o almacenes intermedios para el aprovisionamiento de la célula. Además de estos elementos, la célula cuenta con una cinta automática de transporte y dos brazos mecánicos o robots que se desplazan en un carril contiguo e independiente a la cinta. Estos robots se encargan de coger y soltar los tochos y piezas de la cinta y de introducirlos y sacarlos de las distintas máquinas. Las dimensiones de todos los elementos que componen la célula y su disposición dentro de la misma son las siguientes:

- Fresadoras. Cada fresadora ocupa un área de $2.5 \times 2 \text{ m}^2$ y se encuentran separadas por una distancia de 2.5 metros, para que las operaciones de limpieza y mantenimiento de las máquinas pueda llevarse a cabo de forma rápida y cómoda. La *fresadora 1* se sitúa al inicio de la célula y la *fresadora 2* se sitúa justo a continuación.
- Rectificadora. La rectificadora se localiza a 2.5 metros de distancia de la *fresadora 2*, tanto horizontal como verticalmente, tal y como se muestra en la figura 4.21. De esta forma la célula toma la forma de U que inicialmente se decidió adoptar. Al igual que las fresadoras la rectificadora ocupa un espacio en planta de $2.5 \times 2 \text{ m}^2$.

- Máquina de medición de coordenadas. Esta máquina se sitúa a 2.5 metros, tanto en horizontal como en vertical, de la rectificadora, justamente opuesta a la *fresadora 2*. Sus dimensiones en la planta son de 2x1.5 m².
- Máquina de limpieza. También separada 2.5 metros de la máquina anterior, la máquina de limpieza ocupa un área de 3x2 m², que constituye el espacio que ocupa la propia máquina y espacio para que el operario encargado de este proceso pueda trabajar con comodidad.
- Almacenes intermedios. Los estantes de tochos, útiles y piezas ocupan, cada uno, un área de 1x0.5 m², sin embargo, cada uno se sitúa a una distancia distinta de las máquinas: el estante de tochos constituye el inicio de la célula de fabricación y se encuentra a 1.5 metros de la *fresadora 1*; el de útiles, contiguo a la *fresadora 2*, se sitúa a 1.5 metros de ésta; el estante donde se depositan las piezas que no cumplen los requisitos de diseño, se sitúa junto a la máquina de verificación, a 0.5 metros; el estante en el que se colocan las piezas verificadas para ser limpiadas por lotes se sitúa a 0.5 m del final de la cinta transportadora de material; por último, el estante de piezas terminadas se localiza al final de la célula, a 1 metro de la máquina de limpieza.
- Cinta transportadora de material. Al ser una célula de fabricación flexible, el transporte de piezas entre las diferentes máquinas se realiza de forma automática. De este modo, como puede apreciarse en la figura 4.21, todas las máquinas están conectadas mediante una cinta transportadora de 0.5 metros de ancho y aproximadamente 20.6 metros de longitud en forma de U. La cinta se coloca desde el primer estante intermedio que alberga los tochos hasta 2 metros después de la máquina de verificación, ya que el proceso de limpieza es manual, y el operario es quien las retira de la cinta y las coloca en el cuarto estante intermedio hasta que se complete un lote de piezas para poder introducirlas en la máquina de limpieza. Esta cinta transporta los tochos de material y las piezas a una velocidad de 0.1 m/s.
- Brazos mecánicos o robots. Para las operaciones de alimentación y carga y descarga de tochos, piezas, útiles y herramientas, la célula de fabricación cuenta con dos robots móviles de brazo articulado [subsección 2.5.1] que se desplazan sobre un carril guía para dar servicio a más de una máquina. El primer robot sirve a las dos fresadoras y el segundo, a la rectificadora y a la máquina de medición de coordenadas. Como elemento terminal, ambos cuentan con pinzas a presión que sujetan mediante rozamiento las piezas durante su manipulación.



Figura 4. 19. Ejemplo de brazo mecánico o robot con pinza a presión.
Fuente: www.ingenieriatecnoindustrial.blogspot.com

- Carril para el desplazamiento de robots. Los robots se desplazan sobre un carril contiguo a la cinta transportadora de material que se extiende en forma de U junto a las máquinas. Este carril queda emplazado, por tanto, entre las máquinas y la cinta de material, quedando separado de todas ellas 0.2 metros. El carril tiene 0.3 metros de ancho y aproximadamente 20 metros de longitud, estando su inicio en la *fresadora 1* y su final, tras el estante de piezas no conformes a la verificación. Durante las operaciones de manipulación y alimentación de tochos y piezas a las máquinas-herramienta, los robots se posicionan sobre el carril en el centro de cada máquina y su velocidad de desplazamiento es de 0.2 m/s.

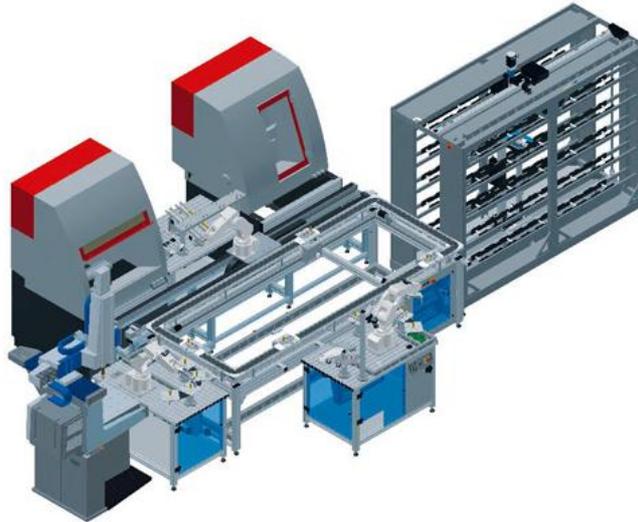


Figura 4. 20. Ejemplo de célula con robots móviles sobre carril.
Fuente: www.festo-didactic.com

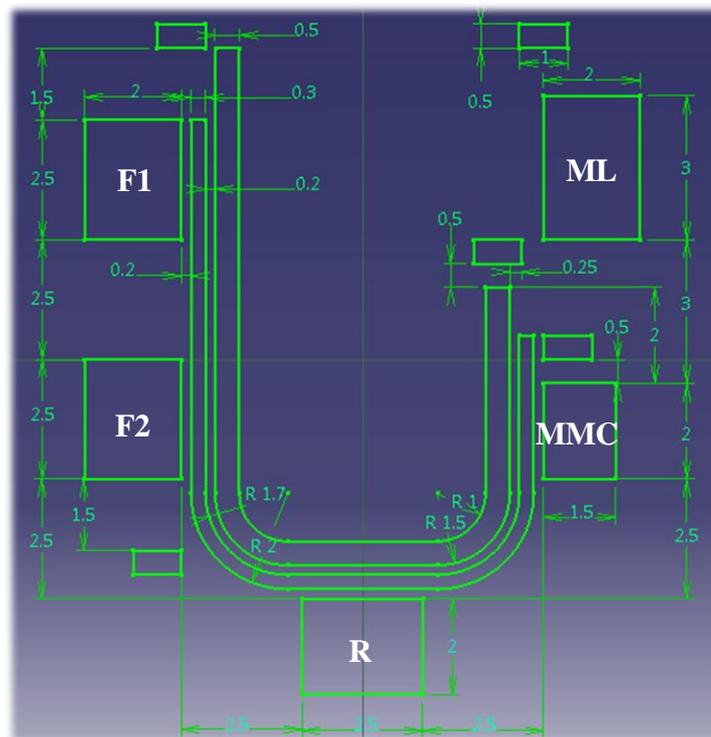


Figura 4. 21. Célula de fabricación en forma de U de la situación inicial. F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

La disposición de todos estos elementos en forma de U, proporciona un espacio interior en la célula de aproximadamente $5 \times 10 \text{ m}^2$, delimitado por la cinta transportadora. Esta zona es idónea para el desplazamiento de operarios dentro de la célula y la realización de operaciones de control y mantenimiento.

El área ocupada por célula en la planta es aproximadamente de $14 \times 11.5 \text{ m}^2$, siendo 14 metros la distancia entre las caras exteriores de las estanterías de tochos y piezas y la parte posterior de la máquina de rectificación y 11.5 metros la distancia de los puntos exteriores a la célula de las máquinas enfrentadas. Para la ubicación de la célula dentro de la planta de producción y respecto a los almacenes se desea que el inicio

de la célula esté lo más cerca posible al almacén de tochos, al mismo tiempo que el extremo final de la célula se sitúe cerca del almacén de piezas. Por ello, se decide que la célula quede ubicada en la zona central de los almacenes, de forma que los extremos de la misma queden próximos a los dos pasillos entre almacenes para facilitar el transporte de tochos a la célula y de piezas al almacén. La distancia desde los extremos de la célula, tomando como extremos las estanterías a pie de máquina de tochos y piezas, hasta los almacenes es de 5 metros, distancia suficiente para que los desplazamientos de materiales entre ambos puedan realizarse de una forma cómoda y segura. Esa misma distancia separa la célula de la pared derecha de la planta, mientras que de la pared inferior dista aproximadamente 3 metros. De la pared izquierda la célula se encuentra a 16.5 metros, por lo que el mayor espacio libre de la planta se tiene en la zona inferior izquierda, espacio destinado a otras operaciones que deban realizarse fuera de la célula, como el vaciado de la cuba de desechos, los desplazamientos de operarios y de materiales a la célula, o a la implantación de paneles informativos para tareas de gestión y control de la producción.

Flujos de material y útiles

La disposición de la célula y los almacenes dentro de la planta influye directamente en el número y en la secuencia de los movimientos de los materiales tanto dentro como fuera de la célula de fabricación. Cuanta más distancia exista entre almacenes y célula, mayores serán las distancias que deban recorrer dichos materiales para ser procesados y almacenados y mayor será el tiempo de entrega final del producto.

Cada tipo de pieza que se fabrica en la célula tiene asociados unos desplazamientos determinados relacionados con su almacenamiento y proceso de fabricación. A continuación se detallan los lugares y los procesos por los que va pasando de forma sucesiva cada tipo de pieza y se representa el flujo de materiales durante el proceso productivo.

▪ **Flujo de piezas tipo A**

- Recepción de tochos de piezas tipo A.
- Almacenamiento de tochos en el almacén de tochos para piezas tipo A.
- Colocación de los tochos en el primer almacén intermedio situado al inicio de la célula.
- Mecanizado en la fresadora 1.
- Repaso en la rectificadora.
- Verificación de las dimensiones en la máquina de medición de coordenadas.
- Colocación de las piezas conformes en el estante anterior a la máquina de limpieza/colocación de piezas no conformes en el estante de piezas defectuosas.
- Limpieza/transporte a la cuba de desechos.
- Colocación de las piezas acabadas en la estantería situada al final de la célula.
- Almacenamiento de las piezas en el almacén de piezas tipo A.

▪ **Flujo de piezas tipo B**

- Recepción de tochos de piezas tipo B.
- Almacenamiento de tochos en el almacén de tochos para piezas tipo B.
- Colocación de los tochos en el primer almacén intermedio situado al inicio de la célula.
- Mecanizado en la fresadora 2.
- Repaso en la rectificadora.
- Verificación de las dimensiones en la máquina de medición de coordenadas.
- Colocación de las piezas conformes en el estante anterior a la máquina de limpieza/colocación de piezas no conformes en el estante de piezas defectuosas.
- Limpieza/transporte a la cuba de desechos.
- Colocación de las piezas acabadas en la estantería situada al final de la célula.
- Almacenamiento de las piezas en el almacén de piezas tipo B.

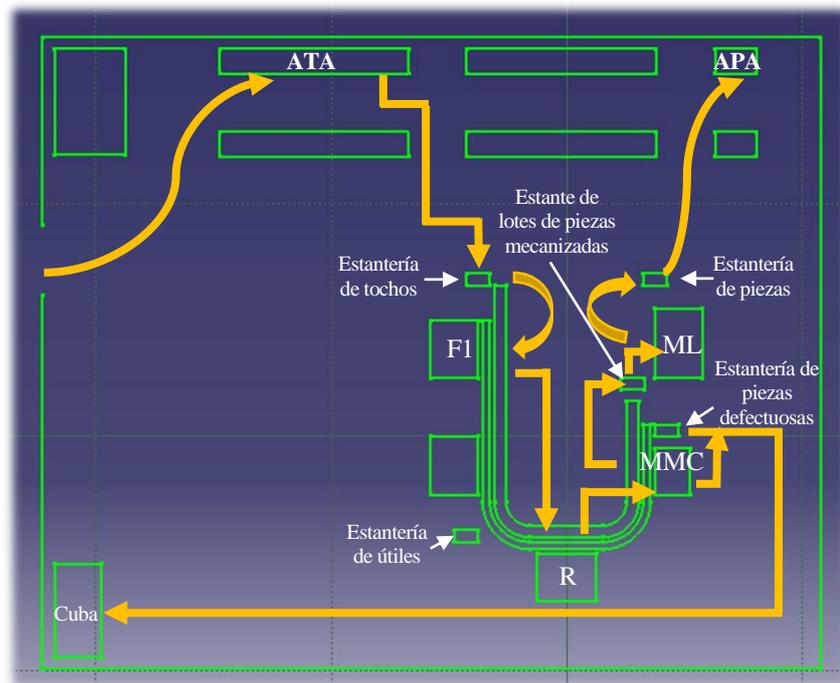


Figura 4. 22. Flujos de material de las piezas de tipo A. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; F1, fresadora 1; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A. Fuente: Elaboración propia.

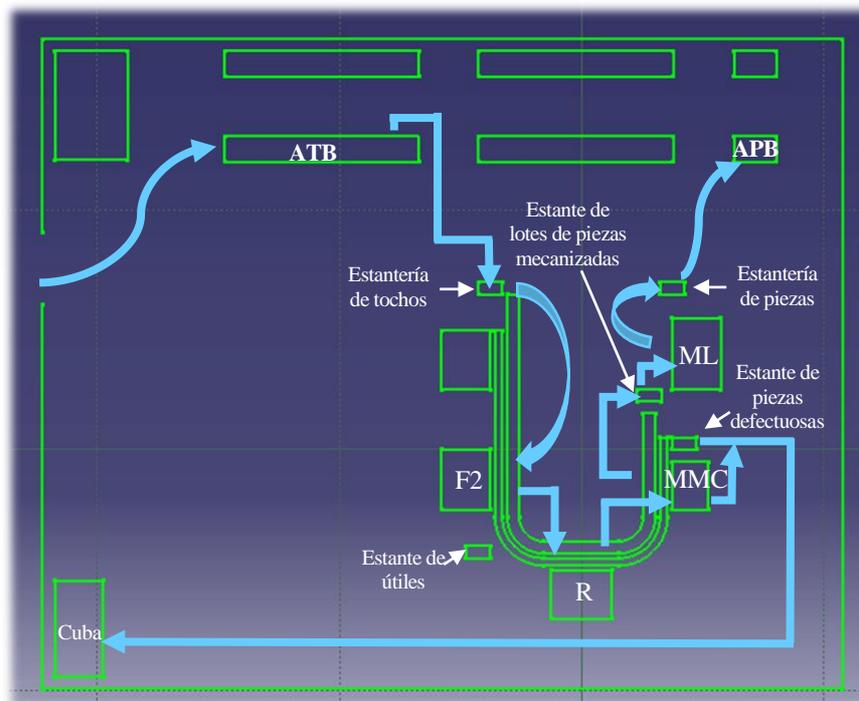


Figura 4. 23. Flujos de material de las piezas de tipo B. ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, resulta conveniente establecer el recorrido de los útiles transportados entre la célula y los almacenes para visualizar las posibles interferencias con los flujos de material.

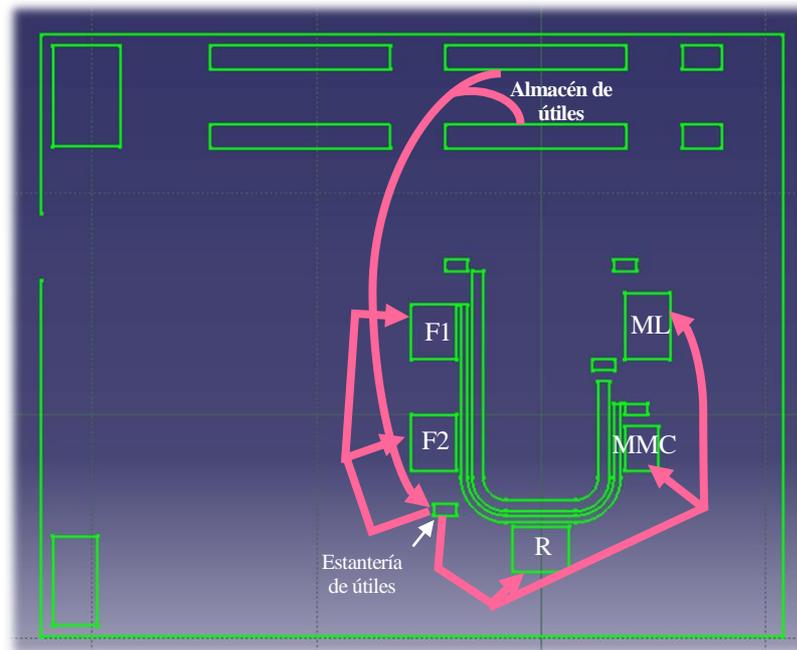


Figura 4. 24. Flujos de útiles. F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

Una vez planteados los flujos de útiles y materiales de cada tipo por separado, resulta conveniente superponerlos en una misma figura para visualizar el total de los desplazamientos de tochos, útiles y piezas, lo cual será de gran utilidad para gestionar la producción y establecer el número de operarios necesarios para llevar a cabo la producción. En la figura 4.25 se representan los flujos para cada tipo de pieza.

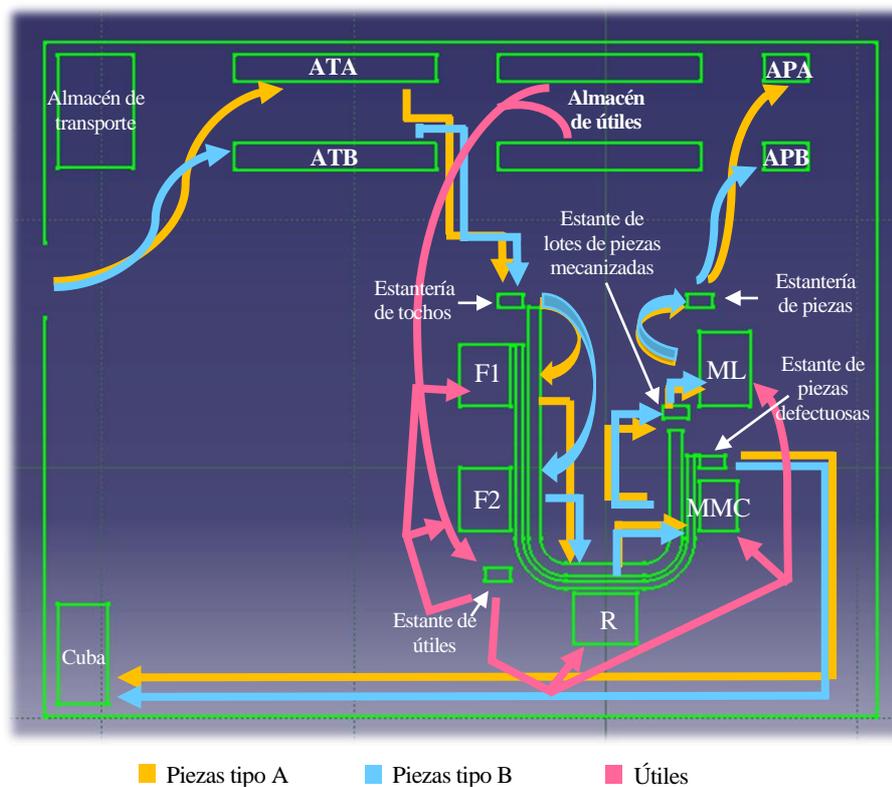


Figura 4. 25. Flujos de útiles y material de las piezas de ambos tipos. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura anterior y de todas las decisiones tomadas al respecto sobre la producción en la célula puede establecerse la saturación u ocupación de las máquinas, es decir, el porcentaje de piezas del total que son procesadas en cada una de ellas. De este modo, las *fresadoras 1 y 2* tienen una saturación del 50 %, ya que cada una de ellas sólo fresa un tipo de pieza. Las máquinas restantes, rectificadora, máquina de verificación de coordenadas y máquina de limpieza, poseen una saturación del 100 %, puesto que todas las piezas pasan por dichas máquinas. El proceso de fabricación más crítico es el de rectificación, ya que a la entrada de esta máquina puede producirse un cuello de botella que ralentice la producción global de la célula. Por último puede observarse que el flujo de útiles y herramientas puede interferir con el de tochos cuando son conducidos hacia la célula para su aprovisionamiento antes del inicio de la fabricación.

4.2.6. Operarios

El estudio de los flujos de materiales y útiles y la necesidad de transportarlos a diferentes puntos de la fábrica dentro del proceso productivo influye directamente en el número de operarios imprescindibles para realizar dichas tareas. De la misma forma, la automatización de las operaciones y del cambio autónomo de piezas y herramientas, junto a la cinta transportadora de piezas unida a las máquinas, disminuye el número de empleados en planta, limitando la intervención humana a las siguientes tareas dentro y fuera de la célula:

1. Recepción de los tochos de aluminio comprados.
2. Transporte de los tochos desde el almacén hasta el primer almacén intermedio, donde se ordenan los diferentes tochos según el tamaño.
3. Transporte de las herramientas y útiles hasta la célula.
4. Inicio del proceso de fabricación colocando los tochos al principio de la cinta.
5. Supervisión de las operaciones, control de averías y paradas, comprobación del flujo regular de materiales, inspección de defectos, verificación de las normas de trabajo, vigilancia de la seguridad en el trabajo, etc.
6. Puesta a punto de los equipos antes del inicio de la fabricación, mantenimiento y limpieza de espacios de trabajo.
7. Proceso de limpieza. Una vez están las piezas junto a la máquina de limpieza el operario las introduce en la máquina junto a una solución de limpieza e inicia el proceso pulsando un botón. Tras el tiempo establecido, recoge las piezas y las deja secar.
8. Colocación de las piezas ya limpias en el cuarto almacén intermedio, a la salida de la célula.
9. Transporte de las piezas desde ese almacén intermedio hasta el almacén de piezas.
10. Transporte de las piezas defectuosas desde el estante hasta la cuba de residuos.
11. Devolución de tochos no usados a su almacén.
12. Limpieza de las máquinas, robots y herramientas.
13. Limpieza de la célula.

La *sexta decisión* consiste en determinar el número de operarios necesarios para cubrir las tareas anteriores y asociar dichas tareas a cada uno de ellos. Teniendo en cuenta el número y el momento de ejecución de las tareas se decide contar con 3 operarios y 1 supervisor por cada turno de trabajo:

- El *operario 1* es el encargado del transporte de materiales y útiles entre la célula y los diferentes puntos de almacenamiento. Este trabajador se encarga de las tareas 1, 2, 4, que se realizan antes del inicio de la fabricación en la célula y de las tareas 9 y 11, que se llevan a cabo tras la limpieza de las piezas.
- El *operario 2* lleva a cabo las tareas 3, 6 y 13 de la lista anterior.
- El *operario 3* se encarga de las tareas 7 y 8 relacionadas con el proceso de limpieza dentro de la célula, y de las tareas 10 y 12.
- El *supervisor* controla los aspectos de la producción descritos en la tarea 5. La supervisión se realiza para cada tarea u operación, ya sea realizada de forma manual o automática.

Todas estas tareas llevan consigo un elevado número de desplazamientos por la planta de fabricación. Para cuantificar y visualizar dichos movimientos se puede hacer uso del llamado *Diagrama de Espaguetti*, una representación de todos los movimientos de cada operario dentro de su puesto de trabajo que busca el orden más lógico en el que deben llevarse a cabo los flujos de materiales y útiles para reducir la distancia recorrida por los trabajadores.

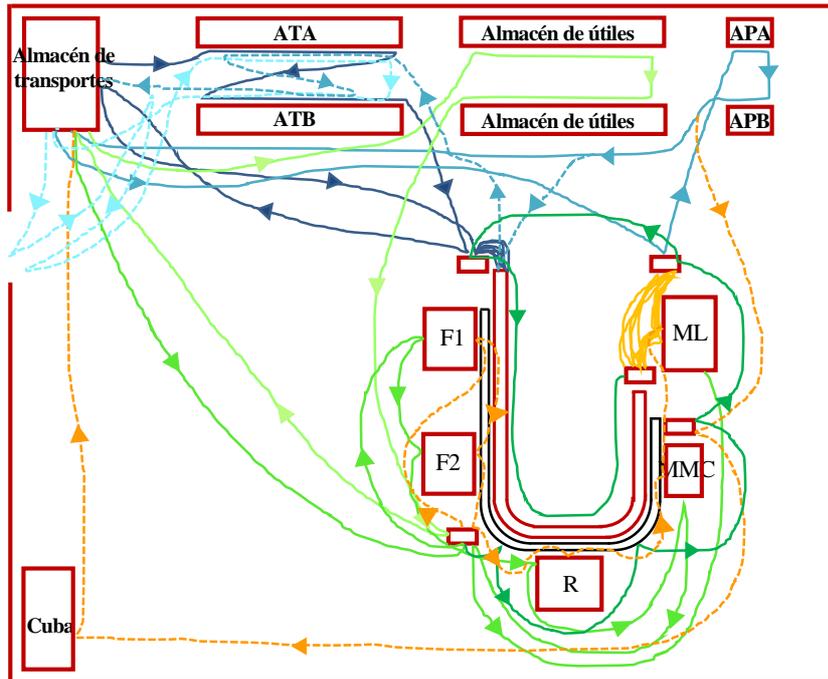


Figura 4. 26. Diagrama de espagueti de todos los movimientos de los trabajadores en la situación inicial. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.26 se muestran los desplazamientos de los tres operarios durante la fabricación en un turno, diferenciados por colores: el azul para el *operario 1*, el verde para el *operario 2* y el naranja para el *operario 3*. Asimismo se diferencian las distintas tareas de un mismo operario con las diversas tonalidades de dichos colores y la frecuencia de realización de cada una de ellas según el trazo sea continuo (se realiza siempre en cada turno) o discontinuo (se realiza con cierta frecuencia).

- El turno del *operario 1* comienza con el aprovisionamiento de tochos y la colocación de los mismos en la cinta, que se representan por la línea continua azul oscuro. La recepción de tochos se realiza en un período de tiempo comprendido entre el fin de la colocación de los tochos en la cinta y el fin de la limpieza de las piezas. Durante la recepción, el operario se dirige a la entrada de la planta con un transpaleta manual y tras dos viajes al almacén, coloca los 1000 tochos que se reciben. Esta tarea se representa mediante líneas discontinuas de color azul claro. Una vez concluida la limpieza de todas las piezas, el *operario 1* finaliza su turno de trabajo con la colocación de las mismas en el almacén correspondiente; el camino se representa mediante una línea continua de color azul. Tras dicha colocación, en la figura puede apreciarse que el camino que el operario seguiría hasta el almacén de transportes para dejar la carretilla manual se bifurca en otro, representado por una línea discontinua azul, que muestra el camino alternativo que seguiría el operario si durante la fabricación no se producen piezas defectuosas, por lo que los tochos que sobran se devuelven a su almacén.
- El *operario 2* en cada turno se dirige, en primer lugar al almacén de útiles con una carretilla para aprovisionar la célula con las herramientas y útiles necesarios. Dicha tarea se representa mediante las líneas de color verde claro. Después de colocar de nuevo la carretilla en el almacén de transporte, el *operario 2* se encarga de la puesta a punto de las máquinas, desplazándose para ello hasta la posición de cada una de ellas. Estos desplazamientos quedan reflejados en la figura 4.26 mediante líneas continuas de color verde de un tono algo más oscuro que el anterior. Tras finalizar la fabricación de las piezas y en un verde más oscuro se muestra el desplazamiento del operario en la tarea de limpieza de los estantes, robots y espacios de trabajo. Partiendo del estante intermedio de útiles, donde también se emplazan equipos y productos para la limpieza, se dirige hacia el carril guía de los robots para asear tanto el carril como los robots de

restos de virutas y fluidos de corte. Seguidamente, el operario va recorriendo la célula exteriormente limpiando los demás estantes y finaliza con la limpieza del suelo interior de la célula.

- El *operario 3*, durante la fabricación de las piezas, no se desplaza fuera de su área de trabajo, junto a la máquina de limpieza. Sus desplazamientos se limitan a moverse entre dicha máquina y los estantes de piezas verificadas y piezas fabricadas, que se representan mediante las líneas continuas de color naranja. Además de la limpieza de las piezas, este operario también se encarga de la limpieza de las máquinas que se realiza con cierta frecuencia tras la limpieza general que realiza el *operario 2*. En esta tarea es necesario retirar tanto la cinta de materiales como el carril guía de los robots, puesto que no existe suficiente espacio entre éstos y las máquinas, de ahí que no se realice diariamente. Los desplazamientos durante la limpieza se muestran en la figura 4.26 mediante líneas discontinuas de un color naranja más oscuro que el que representa la limpieza de piezas. En los turnos en los que se producen piezas defectuosas y, por tanto, se vuelven a fabricar dichas piezas, es el *operario 3* quien almacena las piezas terminadas y no el *operario 1*. Asimismo tras finalizar esta tarea el operario se dirige al estante de piezas defectuosas y las traslada hasta la cuba de desechos y finaliza el desplazamiento dejando la carretilla manual en el almacén de transportes. Este camino se representa mediante línea discontinua de color naranja.

Los desplazamientos del supervisor, sin embargo, no se incluyen en la figura 4.26 ya que su labor consiste en desplazarse constantemente por la planta verificando que todo vaya correctamente, lo que entorpecería la visualización de la ilustración.

4.2.7. Producción: tiempos y proceso de fabricación

El volumen de producción que se desea fabricar en un determinado período de tiempo influye en numerosos aspectos de la producción: número de máquinas de la célula, capacidad de los almacenes, número de operarios dentro y fuera de la célula, tiempo de fabricación total del volumen exigido, etc. Por volumen de producción se entiende el número de unidades de una pieza o producto elaborado anualmente por la planta. Se distinguen tres gamas de cantidades: baja, si se producen menos de 500 unidades; media, entre 500 y 50.000 unidades; y alta producción, entre 50.000 y millones de unidades anuales.

La *séptima decisión* consiste en establecer el volumen de producción de la célula y determinar el tiempo de fabricación de dicho volumen. Se decide así que el sistema productivo sea capaz de hacer frente a una producción diaria de 40 piezas, 20 de tipo A y 20 de tipo B, mediante dos turnos de trabajo de 8 horas durante 5 días a la semana. Estableciendo como promedio 250 días laborables al año en Andalucía, se tiene una producción anual de 10.000 piezas, volumen medio de producción propio de la fabricación mediante células.

Uno de los objetivos de la fabricación Lean es la reducción del *Lead Time*, para procurar que el cliente obtenga su producto lo antes posible. Por ello, deben estudiarse todos los tiempos que forman parte de la producción (tiempos de fabricación, esperas, tiempo destinados a los desplazamientos, tiempos dedicados a la preparación de equipos, etc.) para identificar los posibles desperdicios y eliminarlos o reducirlos cuanto sea posible. En esta subsección se pretende determinar el tiempo total de producción y la periodicidad de todas las tareas, desde la recepción de los tochos de material hasta el almacenamiento, así como describir en detalle cada una de ellas. Se va a seguir el siguiente esquema para describirlas y establecer sus tiempos de operación en cada turno de trabajo.

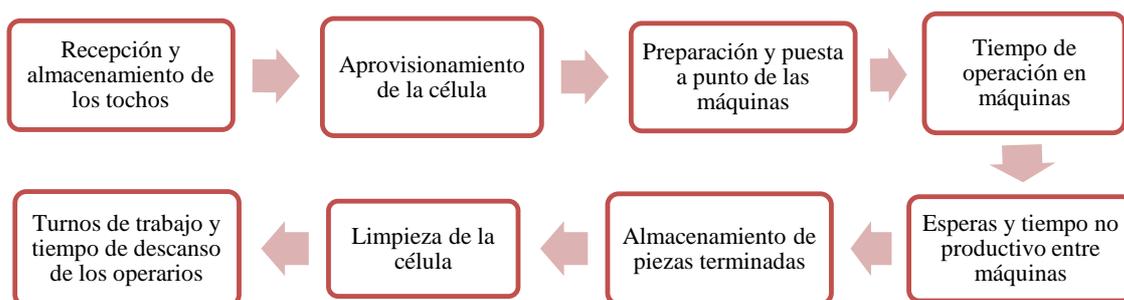


Figura 4. 27. Fases del estudio de tareas y tiempos involucrados en la producción de las piezas. Fuente: Elaboración propia.

- Recepción y almacenamiento de tochos

Una vez comprados los tochos de aluminio, la recepción y transporte hasta el almacén se realiza de forma manual. El *operario 1* realiza la carga, descarga, transporte y almacenamiento de los tochos recibidos mediante una transpaleta manual. La producción diaria de la célula es de 40 piezas, lo que supone que al mes se producen 800 piezas no defectuosas. Teniendo en cuenta la capacidad del almacén de tochos y que en ese período de tiempo pueden producirse y desecharse algunas piezas defectuosas, por lo que se necesitarían más de 800 tochos para producir 800 piezas conformes, se recibe un pedido de 1000 tochos, 500 de cada tipo de pieza, cada dos meses. El transporte de los 1000 tochos hasta el almacén se realiza en dos viajes. Primero, tras cargar la transpaleta con 500 tochos de uno de los tipos de piezas, el operario los desplaza hasta la entrada del almacén de tochos, donde los sitúa en el suelo para luego colocarlos en los respectivos cajones. Después, ya con la transpaleta vacía, se dirige de nuevo a la entrada de la planta, donde vuelve a cargar los otros 500 tochos para realizar la misma operación. Una vez, dispuestos todos los tochos en el suelo, el operario los va colocando en su cajonera correspondiente según al tipo de pieza que correspondan. Es conveniente puntualizar y recordar que cada cajón de dicho almacén tiene una longitud de 1 metro y que la máxima longitud de ambos tipos de tochos es igual a 365 mm, por lo que en cada cajón podría guardarse más de un tocho si fuese necesario.

Puesto que la recepción de material se realiza cada dos meses, el tiempo que el operario emplea para ello no recae directamente sobre el tiempo de producción diaria, sin embargo, su determinación es necesaria para cerciorar que dicho tiempo forma parte del turno del operario y no suponga que deba realizarse fuera del horario laboral. De este modo se estima que el tiempo empleado en la recepción y almacenamiento de tochos, incluyendo las operaciones de carga y descarga en la transpaleta y transporte hasta el almacén, y de gestión de la operación, es de **una hora**.

- Aprovisionamiento de la célula

Antes de iniciar el proceso de fabricación dentro de la célula, ésta debe aprovisionarse de los tochos de material, a partir de los cuales se obtendrán las piezas, y de los útiles necesarios que se utilizan en cada operación y máquina. Por ello, la primera tarea que realiza diariamente el operario en cada turno de trabajo es transportar 28 tochos de material (14 de cada tipo, 10 que deben fabricarse y 4 por si se produce alguna pieza defectuosa y se repite el proceso) a la célula y colocarlos en la estantería situada junto a la *fresadora 1*. Esta tarea conlleva que el *operario 1* se desplace hasta el almacén de carretillas manuales para coger una, se dirija hasta las cajoneras de tochos, cargue la carretilla con los tochos necesarios y los transporte y coloque en la estantería al inicio de la célula. Todo ello se realiza en un tiempo de **20 minutos**.

Al mismo tiempo que la célula es provista de los tochos, el *operario 2* toma otra de las carretillas y se dirige hasta el almacén de útiles y herramientas donde selecciona de ambas cajoneras los que deba colocar en el almacén intermedio de útiles de la célula. La recogida en el almacén, el transporte y la colocación de los útiles en la célula se realiza una vez por turno y supone un tiempo de **20 minutos**.

- Preparación y puesta a punto de las máquinas

Una vez la célula queda provista de los útiles en la estantería correspondiente el *operario 2* de cada turno, encargado de las labores de limpieza y mantenimiento, realiza una rápida inspección a cada máquina en la que se asegura de que cada una cuenta con las herramientas, utillajes, fluidos de corte, solución de limpieza y otros elementos necesarios para cada operación. Si alguna máquina no está provista de los útiles necesarios, basta con que el operario se dirija al almacén intermedio de útiles de la célula, tome los que cada máquina precise y los coloque en el lugar correspondiente. Asimismo, el operario realiza las labores de engrase de las máquinas, las comprobaciones oportunas que aseguren el correcto funcionamiento del proceso y la puesta en marcha de máquinas y robots. Las operaciones iniciales de preparación consumen un tiempo de **40 minutos**.

- Tiempo de fabricación en cada máquina

A lo largo de todo el capítulo se han ido describiendo los elementos que componen tanto la célula de fabricación como la planta de producción, al mismo tiempo que se ha descrito de forma general la secuencia de operaciones y el proceso de fabricación de las piezas. A continuación se describe de forma exhaustiva todo el proceso productivo dentro de la célula, detallando en todo momento el tiempo empleado en cada

operación. Para cuantificar dichos tiempos se han elaborado las tablas 4.1 y 4.2 a las que se hará referencia durante la explicación. Para seguir adecuadamente el desarrollo de la explicación del proceso y de los tiempos, se deben tener en cuenta los siguientes comentarios y aclaraciones respecto a las tablas:

- Los tochos y las piezas se nombran por la letra, A o B, según del tipo que sean y por un número, del 1 al 10, según el orden de entrada en la cinta. Los tiempos de fabricación de las piezas de tipo A se recogen en la tabla 4.1, mientras que los de las piezas de tipo B se recogen en la tabla 4.2.
- La primera columna de las tablas muestran los procesos y los desplazamientos o esperas entre máquinas. La segunda columna recoge las distancias entre máquinas y elementos de la célula para, en la tercera columna, calcular el tiempo que tardan las piezas sobre la cinta en recorrer dicha distancia. Para ello, se ha tenido en cuenta que la cinta transportadora desplaza las piezas a una velocidad de 0.1 m/s. En la tercera columna, además, se anotan los tiempos de procesado en cada máquina obtenidos de las capacidades impuestas por las características de la célula en el punto de partida [sección 4.1]. De esta forma una capacidad de 3 piezas/hora supone un tiempo de procesado de 20 minutos por pieza, mientras que una capacidad de 4 o 6 piezas/hora indica que la máquina tarda 15 o 10 minutos, respectivamente, en procesar una pieza. En el tiempo de procesado se incluyen tanto las operaciones de fabricación como las de posicionamiento y cambio de herramientas que sea necesario realizar durante las mismas.
- Las 10 columnas restantes de cada tabla recogen los diferentes tiempos de fabricación expresados en segundos. De esta forma, aparecen en cada casilla de la tabla dos cantidades separadas: el número de la izquierda es el tiempo transcurrido desde el inicio de la fabricación hasta el instante antes del proceso, movimiento o espera al que tenga que someterse cada pieza y el de la derecha, el tiempo transcurrido desde el inicio de la fabricación hasta finalizar dicho proceso, movimiento o espera; o, en otras palabras, el tiempo de la izquierda más el tiempo en llevar a cabo el proceso, movimiento o espera.
- Para calcular las distancias recorridas por las piezas entre máquinas y robots, es necesario conocer la posición de los robots durante la manipulación de las piezas. Los robots se sitúan en el centro de cada máquina; así, por ejemplo, si la *fresadora 1* tiene 2.5 metros de longitud, el robot se coloca de forma que el centro del mismo esté situado a 1.25 m de cada extremo de la máquina. Como del extremo de la cinta a la *fresadora 1* hay 1.5 metros, se tiene que la pieza debe recorrer esa distancia más 1.25 metros desde el extremo de la *fresadora 1* hasta el robot. Los robots se posicionan en las otras máquinas de la misma forma, por lo que resulta sencillo calcular en cada momento el espacio que deben recorrer las piezas sobre la cinta.
- El *robot 1* abastece a las *fresadoras 1* y *2*, mientras que el *robot 2* se encarga de introducir y sacar las piezas de la rectificadora y la máquina de medición de coordenadas.
- Se fija el tiempo de manipulación de las piezas en 20 segundos, tanto para robots como para el operario de limpieza.
- La secuencia de entrada de las piezas en la cinta es: A1, B1, A2, B2, A3, B3, A4, B4, A5, B5, A6, B6, A7, B7, A8, B8, A9, B9, A10, B10.

Teniendo en cuenta las aclaraciones anteriores, se va a detallar el proceso de fabricación en un turno de trabajo de las dos primeras piezas introducidas en la cinta, A1 y B1, ya que el proceso seguido por las demás es el mismo y en las tablas 4.1 y 4.2 se detallan los tiempos para todas ellas.

Antes de iniciar la fabricación, todos los tochos están colocados en el estante situado junto a la *fresadora 1*, al inicio de la célula. El proceso comienza con la colocación del primer tocho de tipo A, A1, en la cinta. Por tanto, todas las piezas posteriores a la primera, de ambos tipos, asumen un tiempo de espera hasta ser colocadas en la cinta; tiempo que aumenta desde la segunda pieza colocada hasta la última y que se refleja en la primera fila de las tablas 4.1 y 4.2. La distancia que recorren las piezas de tipo A, desde su entrada a la cinta hasta la posición del *robot 1* centrado en la *fresadora 1*, es de 2.75 m. Teniendo en cuenta que la velocidad de la cinta es de 0.1 m/s, dicha distancia tarda en recorrerse 28 segundos aproximadamente.

| Movimiento/proceso | Distancia | Tiempos | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 1245 | 2490 | 3735 | 4980 | 6225 | 7470 | 8715 | 9960 | 11205 |
| Entrada cinta-robot 1 | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 | 3735/3763 | 4980/5008 | 6225/6253 | 7470/7498 | 8715/8743 | 9960/9988 | 11205/11233 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 | 3763/3783 | 5008/5028 | 6253/6273 | 7498/7518 | 8743/8763 | 9988/10008 | 11233/11253 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 | 3783/4983 | 5028/6228 | 6273/7473 | 7518/8718 | 8763/9963 | 10008/11208 | 11253/12453 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 | 4983/5003 | 6228/6248 | 7473/7493 | 8718/8738 | 9963/9983 | 11208/11228 | 12453/12473 |
| Cinta-robot 2 | 10 m | 100 s | 1268/1368 | 2513/2613 | 3758/3858 | 5003/5103 | 6248/6348 | 7493/7593 | 8738/8838 | 9983/10083 | 11228/11328 | 12473/12573 |
| Espera | | | 1368/2056 | 2613/3936 | 3858/5816 | 5103/7696 | 6348/9576 | 7593/11456 | 8838/13336 | 10083/15216 | 11328/17096 | 12573/18976 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 3936/3956 | 5816/5836 | 7696/7716 | 9576/9596 | 11456/11476 | 13336/13356 | 15216/15236 | 17096/17116 | 18976/18996 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 3956/4856 | 5836/6736 | 7716/8616 | 9596/10496 | 11476/12376 | 13356/14256 | 15236/16136 | 17116/18016 | 18996/19896 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 4856/4876 | 6736/6756 | 8616/8636 | 10496/10516 | 12376/12396 | 14256/14276 | 16136/16156 | 18016/18036 | 19896/19916 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 4876/4924 | 6756/6804 | 8636/8684 | 10516/10564 | 12396/12444 | 14276/14324 | 16156/16204 | 18036/18084 | 19916/19964 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 4924/4944 | 6804/6824 | 8684/8704 | 10564/10584 | 12444/12464 | 14324/14344 | 16204/16224 | 18084/18104 | 19964/19984 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 4944/5544 | 6824/7424 | 8704/9304 | 10584/11184 | 12464/13064 | 14344/14944 | 16224/16824 | 18104/18704 | 19984/20584 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 5544/5564 | 7424/7444 | 9304/9324 | 11184/11204 | 13064/13084 | 14944/14964 | 16824/16844 | 18704/18724 | 20584/20604 |
| Cinta-operario 3 | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 5564/5594 | 7444/7474 | 9324/9354 | 11204/11234 | 13084/13114 | 14964/14994 | 16844/16874 | 18724/18754 | 20604/20634 |
| Espera lote | | | 3714/4654 | 5594/7474 | - | 9354/10294 | 11234/13114 | - | 14994/15934 | 16874/18754 | - | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4654/4674 | 7474/7494 | 7474/7494 | 10294/10314 | 13114/13134 | 15934/15954 | 18754/18774 | 18754/18774 | 20634/20654 | 20634/20654 |
| Limpieza | - | 20 min | 4674/5874 | 7494/8694 | 7494/8694 | 10314/11514 | 13134/14334 | 15954/17154 | 18774/19974 | 18774/19974 | 20654/21854 | 20654/21854 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5874/6174 | 8694/8994 | 8694/8994 | 11514/11814 | 14334/14634 | 17154/17454 | 19974/20274 | 19974/20274 | 21854/22154 | 21854/22154 |

Tabla 4. 1. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Distancia | Tiempos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|------------------------------|-----------|---------|---------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espera-cinta | | - | 48 | 1293 | 2538 | 3783 | 5028 | 6273 | 7518 | 8763 | 10008 | 11253 |
| Entrada cinta-robot 1 | 7.75 m | 78 s | 48/126 | 1293/1371 | 2538/2616 | 3783/3861 | 5028/5106 | 6273/6351 | 7518/7596 | 8763/8841 | 10008/10086 | 11253/11331 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 126/146 | 1371/1391 | 2616/2636 | 3861/3881 | 5106/5126 | 6351/6371 | 7596/7616 | 8841/8861 | 10086/10106 | 11331/11351 |
| Fresado | - | 15 min | 146/1046 | 1391/2291 | 2636/3536 | 3881/4781 | 5126/6026 | 6371/7271 | 7616/8516 | 8861/9761 | 10106/11006 | 11351/12251 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1046/1066 | 2291/2311 | 3536/3556 | 4781/4801 | 6026/6046 | 7271/7291 | 8516/8536 | 9761/9781 | 11006/11026 | 12251/12271 |
| Cinta-robot 2 | 5 m | 50 s | 1066/1116 | 2311/2361 | 3556/3606 | 4801/4851 | 6046/6096 | 7291/7341 | 8536/8586 | 9781/9831 | 11026/11076 | 12271/12321 |
| Espera | | | - | 2361/2996 | 3606/4876 | 4851/6756 | 6096/8636 | 7341/10516 | 8586/12396 | 9831/14276 | 11076/16156 | 12321/18036 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1116/1136 | 2996/3016 | 4876/4896 | 6756/6776 | 8636/8656 | 10516/10536 | 12396/12416 | 14276/14296 | 16156/16176 | 18036/18056 |
| Rectificado | - | 15 min | 1136/2036 | 3016/3916 | 4896/5796 | 6776/7676 | 8656/9556 | 10536/11436 | 12416/13316 | 14296/15196 | 16176/17076 | 18056/18956 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2036/2056 | 3916/3936 | 5796/5816 | 7676/7696 | 9556/9576 | 11436/11456 | 13316/13336 | 15196/15216 | 17076/17096 | 18956/18976 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2056/2104 | 3936/3984 | 5816/5864 | 7696/7744 | 9576/9624 | 11456/11504 | 13336/13384 | 15216/15264 | 17096/17144 | 18976/19024 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2104/2124 | 3984/4004 | 5864/5884 | 7744/7764 | 9624/9644 | 11504/11524 | 13384/13404 | 15264/15284 | 17144/17164 | 19024/19044 |
| Verificación | - | 10 min | 2124/2724 | 4004/4604 | 5884/6484 | 7764/8364 | 9644/10244 | 11524/12124 | 13404/14004 | 15284/15884 | 17164/17764 | 19044/19644 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 2724/2744 | 4604/4624 | 6484/6504 | 8364/8384 | 10244/10264 | 12124/12144 | 14004/14024 | 15884/15904 | 17764/17784 | 19644/19664 |
| Cinta-operario 3 | 3 m | 30 s | 2744/2774 | 4624/4654 | 6504/6534 | 8384/8414 | 10264/10294 | 12144/12174 | 14024/14054 | 15904/15934 | 17784/17814 | 19664/19694 |
| Espera lote | | | 2774/4654 | - | 6534/7474 | 8414/10294 | - | 12174/13114 | 14054/15934 | - | 17814/18754 | 19694/20634 |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4654/4674 | 4654/4674 | 7474/7494 | 10294/10314 | 10294/10314 | 13114/13134 | 15934/15954 | 15934/15954 | 18754/18774 | 20634/20654 |
| Limpieza | - | 20 min | 4674/5874 | 4674/5874 | 7494/8694 | 10314/11514 | 10314/11514 | 13134/14334 | 15954/17154 | 15954/17154 | 18774/19974 | 20654/21854 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5874/6174 | 5874/6174 | 8694/8994 | 11514/11814 | 11514/11814 | 14334/14634 | 17154/17454 | 17154/17454 | 19974/20274 | 21854/22154 |
| TOTAL | | | 22154 s = 6 h 9 min 14 s | | | | | | | | | |

Tabla 4. 2. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B. Fuente: Elaboración propia.

El *robot 1* recoge la pieza de tipo A y la introduce en la *fresadora 1* tardando en dicho movimiento 20 s. Todo ello supone un tiempo consumido de 48 s desde el inicio de la fabricación. Justo en ese instante, a los 48 segundos, se llevan a cabo dos operaciones simultáneamente: el proceso de fresado de la pieza A1, que consume 20 minutos, y la colocación en la cinta de la segunda pieza, B1. Las piezas de tipo B recorren una distancia de 7.75 m desde su entrada a la cinta hasta la *fresadora 2*, para lo que se tardan 78 s en recorrerla.

La entrada de una pieza de tipo B supone el desplazamiento del *robot 1* hasta la *fresadora 2* en el instante en que deja la pieza A1 en la *fresadora 1*. Una vez posicionado en el centro de la *fresadora 2*, en el segundo 126, recoge la pieza B1 de la cinta y la introduce en la *fresadora 2* tardando 20 s en el movimiento. Tras 15 minutos de fresado de la pieza B1, han pasado desde el inicio de la fabricación 1046 segundos y se tiene que el fresado de la pieza A1 acaba en el segundo 1248. Por ello, el *robot 1* espera a que acabe el fresado de la pieza B1 para posicionarla de nuevo en la cinta. En dicho movimiento emplea 20 s y tras él, se desplaza hasta su posición centrada en la *fresadora 1* para, en el segundo 1248, recoger la pieza de la *fresadora 2* y colocarla en la cinta tras 20 s.

Hasta el momento, se sabe que la pieza B1 se coloca en la cinta tras el fresado en el segundo 1066 y la pieza A1, en el 1268. En dichos instantes las piezas se dirigen por la cinta hacia la rectificadora donde se encuentra el *robot 2*. La distancia existente entre la *fresadora 1* y la posición del *robot 2* centrada en la rectificadora es de 10 metros y se tardan 100 segundos en recorrerla. La distancia entre la *fresadora 2* y dicha posición es de 5 m y se llega tras 50 s.

Puesto que el fresado de la pieza B1 acaba antes, es esta pieza la que primero llega hasta la posición del *robot 2*, el cual la coge y la posiciona en la rectificadora tardando en ello 20 segundos. Por su parte, la pieza A1 llega a la posición del *robot 2* en el segundo 1368, sin embargo, el rectificado de la pieza B1 no acaba hasta el segundo 2036, por lo que se produce una espera al inicio de dicho proceso. Tras 15 minutos de rectificado, el robot coloca de nuevo la pieza B1 en la cinta y seguidamente, toma la pieza A1 de la misma y la coloca en la rectificadora. El robot se desplaza hacia su posición centrada en la máquina de medición de coordenadas y en el segundo 2104 llega la pieza B1, tras 48 segundos que tarda en recorrer los 4.8 metros que separa la posición del *robot 2* en la rectificadora de su posición en la máquina de verificación. En dicho instante, a los 2104 s, el robot coge la pieza B1 y la posiciona en dicha máquina, tardando 20 s. Tras la verificación de 10 minutos, el robot coloca la pieza B1 en la cinta en el segundo 2744 y se dirige hasta su posición en la rectificadora. En el segundo 2976 finaliza el rectificado de la pieza A1 y tras 20 s de movimiento el *robot 2* la coloca en la cinta y ambos recorren 4.8 metros hasta llegar a la máquina de verificación (al ser la velocidad del robot el doble que la de la pieza, el robot siempre está en su posición cuando debe coger una pieza de la cinta o máquina). En el segundo 3044 el robot toma la pieza y la coloca en la máquina y se inicia la verificación en el segundo 3064.

Por su parte, la pieza B1 recorre 3 metros en 30 segundos desde que el *robot 2* la colocó en la cinta tras la verificación hasta que llega a manos del operario en el segundo 2774 y éste la coloca en el estante situado al final de la cinta. En este estante debe esperar hasta que se complete un lote de 3 piezas, para ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza. Después de 10 minutos de verificación de la pieza A1, en el instante 3664, el *robot 2* la coloca en la cinta y la pieza, tras 30 segundos, es colocada en el estante por el operario en el segundo 3714.

Este es el recorrido al que se someten las piezas A1 y B1 durante el proceso. Ahora, queda determinar el instante en el que se colocan las demás piezas en la cinta para sufrir el mismo proceso. Es evidente, que no debe entrar en la cinta una tercera pieza hasta que el *robot 1* no haya concluido la manipulación de la pieza A1 durante el fresado. Como se indica en la tabla 4.1, el robot acaba el posicionamiento de la pieza A1 en la cinta tras el fresado en el segundo 1268. Por otra parte, la pieza A2, tarda en llegar al robot 28 segundos. Por ello, se decide introducir la pieza A2 en la cinta 23 segundos antes de que el robot posicione la pieza A1 en la cinta tras el fresado, para que la pieza A2 llegue al robot 5 segundos después de eso, y el robot tenga tiempo de moverse para coger la pieza A2. Esto mismo pasa con las demás piezas de tipo A. Sin embargo, las piezas de tipo B posteriores se colocan en la cinta en el mismo instante en que la pieza anterior a ella, de tipo A, comienza el fresado. De esta manera, si la pieza A2 comienza a fresarse en el segundo 1293, en ese mismo instante se coloca la pieza B2 en la cinta. De esta manera se van completando todas las casillas de las tablas.

La limpieza se lleva a cabo de forma manual por el operario en lotes de 3 piezas, por lo que las piezas 1 y 2 de cada lote deben esperar 1880 y 940 segundos, respectivamente, hasta que la tercera pieza del lote llegue al estante y puedan ser introducidas en la máquina de limpieza. Una vez llegue la última pieza de cada lote al estante, el operario las lleva hasta la máquina y las introduce junto a la solución de limpieza y acciona el botón de la máquina para que comience el proceso, tardando en ello 20 segundos. Pasados 20 minutos, el operario tarda 5 minutos en extraer las piezas de la máquina de limpieza y en colocarlas, una vez secas, en el estante situado junto a la máquina.

Conclusiones

- La secuencia de salida de las piezas no es la misma que la de entrada. Mientras que el orden de entrada era A1, B1, A2, B2, A3, B3, A4, B4, A5, B5, A6, B6, A7, B7, A8, B8, A9, B9, A10, B10, el de salida es: B1, A1, B2, A2, B3, A3, B4, A4, B5, A5, B6, A6, B7, A7, B8, A8, B9, A9, B10, A10. Esto se debe a que el tiempo de fresado de las piezas de tipo B es menor que el de las piezas de tipo A y a la alternancia del tipo de piezas en la entrada a la cinta.
- El ritmo de fabricación queda determinado por la máquina más lenta, cuya capacidad de producción sea menor. En este caso, dos de las máquinas poseen una capacidad inferior a la de las demás: la *fresadora 1* y la máquina de limpieza. Sin embargo, el ritmo de producción viene marcado por la máquina de limpieza, ya que la *fresadora 1* no tiene ninguna tarea predecesora y fabrica al mismo tiempo que la fresadora 2. Esto se traduce a que como máximo pueden llegar a procesarse en cada máquina 3 piezas en una hora.
- En la siguiente tabla se muestra cada cuanto tiempo sale una pieza procesada de cada máquina.

| | Fresadora 1 | Fresadora 2 | Rectificadora | Máquina de verificación | Máquina de limpieza |
|--------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| Tiempo | 1245 s (20 min, 45 s) | 1245 s (20 min 45 s) | 940 s (15 min 40 s) | 940 s (15 min 40 s) | 2820 s (47 min) |

Tabla 4. 3. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, cada 21 minutos aproximadamente sale una pieza fresada de las *fresadoras 1* y *2*; de la rectificadora y la máquina de medición de coordenadas entra y sale una pieza cada 16 minutos aproximadamente; y de la máquina de limpieza sale un lote cada 47 minutos. En total se introducen 6 lotes de 3 piezas y un lote de 2 piezas en la máquina de limpieza. La secuencia de piezas por lote es la siguiente: B1-A1-B2, A2-B3-A3, B4-A4-B5, A5-B6-A6, B7-A7-B8, A8-B9-A9 y B10-A10. Estos lotes se diferencian con diferentes colores en las dos últimas filas de las tablas 4.1 y 4.2.

- El tiempo total de fabricación es de **22154 segundos** o, en otras palabras, **6 horas y 10 minutos**, aproximadamente.

▪ Esperas y tiempos no productivos entre máquinas

Teniendo en cuenta que cada máquina tiene una capacidad de producción determinada, resulta evidente pensar que durante el desarrollo de la fabricación puedan producirse esperas en torno a una máquina cuya capacidad de producción sea inferior a la de la máquina que la precede.

En las tablas 4.1 y 4.2 también se han cuantificado las esperas (en las filas coloreadas de amarillo), tiempo que las piezas se encuentran paradas en un mismo sitio, y el tiempo en que las piezas son desplazadas por la cinta o manipuladas por un robot u operario y que, por tanto, no se está empleando en realizar ninguna operación sobre ellas. Las esperas se producen en tres actividades durante el proceso de fabricación: colocación de los tochos en la cinta, rectificado de las piezas tras el fresado y espera de las piezas ya verificadas hasta completar un lote para ser limpiadas. Los movimientos sobre la cinta y la manipulación de piezas constituyen el tiempo no productivo. Estos tiempos se cuantifican en la tabla 4.4 a partir de los datos obtenidos de las tablas 4.1 y 4.2.

| Piezas | Entrada a la cinta | Entrada a la rectificadora | Lote de limpieza | Movimientos en la cinta | Manipulación robot/operario | Total por pieza |
|--------|--------------------|----------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| A1 | 0 | 688 | 940 | 206 | 440 | 2274 |
| B1 | 48 | 0 | 1880 | | | 2574 |
| A2 | 1245 | 1323 | 1880 | | | 5094 |
| B2 | 1293 | 635 | 0 | | | 2574 |
| A3 | 2490 | 1958 | 0 | | | 5094 |
| B3 | 2538 | 1270 | 940 | | | 5394 |
| A4 | 3735 | 2593 | 940 | | | 7914 |
| B4 | 3783 | 1905 | 1880 | | | 8214 |
| A5 | 4980 | 3228 | 1880 | | | 10734 |
| B5 | 5028 | 2540 | 0 | | | 8214 |
| A6 | 6225 | 3863 | 0 | | | 10734 |
| B6 | 6273 | 3175 | 940 | | | 11034 |
| A7 | 7470 | 4498 | 940 | | | 13554 |
| B7 | 7518 | 3810 | 1880 | | | 13854 |
| A8 | 8715 | 5133 | 1880 | | | 16374 |
| B8 | 8763 | 4445 | 0 | | | 13854 |
| A9 | 9960 | 5768 | 0 | | | 16374 |
| B9 | 10008 | 5080 | 940 | | | 16674 |
| A10 | 11205 | 6403 | 0 | | | 18254 |
| B10 | 11253 | 5715 | 940 | | | 18554 |

Tabla 4. 4. Tiempo (en segundos) no productivo y esperas durante la fabricación de cada pieza. Fuente: Elaboración propia.

En la primera columna se anota el orden de entrada de los tochos a la cinta; en la segunda, el tiempo que cada pieza espera a ser colocada en la cinta desde que comienza el proceso de fabricación al situar la pieza A1 en la cinta; por esa razón la pieza A1 no se le asocia ningún tiempo de espera. Como resultado se obtiene que todas las piezas entran en la célula pasados 11253 segundos (3 horas, 7 minutos y 33 segundos).

Tras el fresado, las piezas mecanizadas en ambas fresadoras se dirigen hacia la rectificadora. Esto supone la formación de un cuello de botella a la entrada de dicha máquina, por lo que todas las piezas, exceptuando la primera en llegar, tienen que pasar un tiempo en la cinta esperando a ser colocadas en la máquina por el robot 2. En la tercera columna de la tabla se recoge dicho tiempo. El máximo tiempo de espera a la entrada de la rectificadora es de 6403 segundos (1 hora 46 minutos 43 segundos) y se asocia a la pieza A10, última pieza en fabricarse.

En la cuarta columna se anota el tiempo que cada pieza espera en el estante de piezas al final de la cinta y antes del proceso de limpieza. La primera pieza de cada lote es la que tiene un tiempo de espera mayor, como es evidente, siendo este de 1880 segundos (31 minutos, 20 segundos). La segunda pieza de cada lote espera la mitad de tiempo que la anterior, 940 segundos (15 minutos, 40 segundos).

El tiempo no productivo empleado en el movimiento de las piezas en la cinta de una máquina a otra y en la manipulación de las mismas se muestra en las columnas quinta y sexta. Todas las piezas pasan un total de 206 segundos, 3 minutos y 26 segundos, sobre la cinta transportadora y 440 segundos, 7 minutos y 20 segundos, en los robots o en manos del operario de limpieza.

Por último, en la séptima columna de la tabla se calcula el total de tiempo en el que cada pieza no está siendo procesada desde el inicio de la fabricación. El tiempo máximo se da para la última pieza que entra en la cinta, B10, y es de 18554 segundos (5 horas, 9 minutos y 14 segundos).

Una vez calculado el tiempo que las piezas permanecen paradas, a la espera de alguna operación, y el tiempo que están en la cinta o en manos del operario o robot resulta conveniente establecer el porcentaje que suponen estos tiempos no productivos respecto al tiempo total que permanece cada pieza en el interior de la célula. En la tabla 4.5 se compara para cada pieza el tiempo que cada una permanece en la célula, desde que son colocadas inicialmente en la cinta hasta que termina el proceso de limpieza y se sitúan en el estante junto a esta máquina, con las esperas asociadas a cada pieza durante ese tiempo; esto conlleva a que en la tercera columna de la tabla 4.5 no se haya tenido en cuenta el tiempo de espera de cada pieza a ser colocada en la cinta transportadora. De esta forma puede estimarse el porcentaje del tiempo en el que las piezas no están siendo procesadas frente al tiempo total que permanecen en la célula.

| Piezas | Tiempo total en la célula (cinta-fin de limpieza) | Esperas y tiempo no productivo | Esperas y tiempo no productivo (%) |
|--------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| A1 | 6174 | 2274 | 37 |
| B1 | 6126 | 2526 | 41 |
| A2 | 7749 | 3849 | 50 |
| B2 | 4881 | 1281 | 29 |
| A3 | 6504 | 2604 | 40 |
| B3 | 6456 | 2856 | 44 |
| A4 | 8079 | 4179 | 52 |
| B4 | 8031 | 4431 | 55 |
| A5 | 9654 | 5754 | 60 |
| B5 | 6786 | 3186 | 47 |
| A6 | 8409 | 4509 | 54 |
| B6 | 8361 | 4761 | 57 |
| A7 | 9984 | 6084 | 61 |
| B7 | 9936 | 6336 | 64 |
| A8 | 11559 | 7659 | 66 |
| B8 | 8691 | 5091 | 59 |
| A9 | 10314 | 6414 | 62 |
| B9 | 10266 | 6666 | 65 |
| A10 | 10949 | 7049 | 64 |
| B10 | 10901 | 7301 | 67 |
| Media | 8491 | 4741 | 54 |

Tabla 4. 5. Comparativa del tiempo (en segundos) que cada pieza permanece en la célula durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, en esta y en las tablas anteriores, los tiempos de fabricación y tiempo de espera varían para cada pieza, por lo que se establece una media de los mismos para poder sacar algunas conclusiones. El tiempo medio que una pieza permanece en la célula durante el proceso de fabricación es de 8491 segundos, 2 horas y 22 minutos aproximadamente. Este tiempo varía de una pieza a otra debido principalmente al cuello de botella en la entrada de la rectificadora. El tiempo medio de espera y manipulación de las piezas es de 4741 segundos, 1 hora 19 minutos aproximadamente. Esto supone que del tiempo total que las piezas están dentro de la célula, en torno al 54 % permanecen paradas, moviéndose por la cinta o siendo manipuladas.

- Almacenamiento de las piezas terminadas

A medida que las piezas fabricadas son limpiadas y secadas, el operario del proceso de limpieza de cada turno las coloca en la estantería de piezas acabadas junto a la máquina. Cuando las 20 piezas se encuentran en dicha estantería un operario las transporta al almacén de piezas mediante una carretilla manual, donde son almacenadas según el tipo de pieza. El tiempo estimado en ello es de **20 minutos**.

Por otra parte, si al finalizar la fabricación de las 20 piezas no se han utilizado todos los tochos porque no se han producido hasta 8 piezas defectuosas en un mismo turno, el operario debe devolver los tochos a su almacén, para lo que emplearía **15 minutos**.

- Limpieza de la célula

Tras el proceso de fabricación, el operario de cada turno encargado del mantenimiento se ocupa de la limpieza de las zonas de trabajo dentro de la célula. Durante las operaciones de mecanizado se emplean fluidos de corte que ensucian tanto las piezas procesadas como las herramientas y superficies de trabajo en contacto con ellas. Para evitar que la suciedad se acumule día tras día y que las operaciones de corte puedan verse afectadas, se realiza una limpieza rápida de los robots y zonas de trabajo (suelo, estantes, cinta transportadora, etc.) diariamente al finalizar la fabricación de las piezas en cada turno y su duración aproximada es de **40 minutos**.

Sin embargo en esta limpieza general de la célula no se incluye la de las mesas de trabajo ni la de las herramientas de corte de las propias máquinas. Esto es debido al poco espacio existente entre las máquinas y al carril guía de los robots y la cinta transportadora de material, que hacen imposible el paso del operario

entre ellos. Para la limpieza integral de las máquinas es necesario desplazar la cinta y el carril guía de sus posiciones para que el operario pueda realizar cómodamente sus labores. Esta tarea se realiza una vez por semana, y conlleva un tiempo de **una hora**.

▪ Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

Para la producción de 40 piezas diarias es necesario disponer de dos turnos de trabajo de 8 horas cada uno. En cada turno se fabrican 20 piezas y se necesitan tres operarios y un supervisor para la realización de todas las tareas y procesos durante la fabricación. Cada trabajador tiene asignadas unas tareas determinadas y unos tiempos de descanso acordes a las mismas. En la tabla 4.6 se muestra la asignación de las tareas a los trabajadores y el tiempo necesario para cada una de ellas.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|----------------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | - | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Colocación de tochos en la cinta | 3 h 7 min 33 s | - | - | 2 horas |
| | Limpieza de piezas | - | - | 5 h 23 min | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 20 min | - | - | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Limpieza de la célula | | - | 40 min | - | - |
| Limpieza de las máquinas | | - | - | 1 hora | 40 min |

Tabla 4. 6. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores. Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se incluyen todas las tareas, se realicen diariamente o no (las filas completamente coloreadas hacen referencia a las tareas que no se realizan diariamente en ambos turnos), para comprobar que todas ellas puedan realizarse en un turno de trabajo. Asimismo, cabe mencionar que las tareas aquí descritas corresponden al modelo de producción ideal en el que no se producen piezas defectuosas ni paradas en la producción por averías u otros incidentes.

De esta forma y de acuerdo a la tabla 4.6 se puede determinar el horario de trabajo de cada operario y supervisor durante un turno. Se ha de tener en cuenta que el tiempo mostrado en dicha tabla es el tiempo que se requiere para realizar dicha tarea, por lo que en dicha cantidad no se incluye el tiempo necesario de descanso de los operarios ni el tiempo empleado en ponerse los EPIs o Equipos de Protección Individual obligatorios en las tareas que los precisen.

A continuación se va a determinar el horario completo de cada trabajador durante un turno, incluyendo los descansos y la colocación de los equipos de protección necesarios. Para ello se representa mediante una línea de tiempo la duración de cada una de las tareas. En la representación se emplean varios colores para diferenciar el tiempo de trabajo de los descansos y del tiempo empleado para la colocación de los equipos de protección: el rojo simboliza el tiempo destinado a la colocación de los EPIs; el azul oscuro, el tiempo de descanso; el azul, el verde, el naranja y el burdeos representan los tiempos de trabajo del *operario 1*, el *operario 2*, el *operario 3* y el supervisor, respectivamente.

Por otra parte, la fabricación de las piezas en la célula, que de acuerdo a la tabla 4.2 supone un tiempo de 6 horas y 10 minutos, comienza todos los días a las 8:00 y a las 17:00 y finaliza a las 14:10 y a las 23:10 del primer y segundo turno, respectivamente. Dichas horas se representan en las figuras 4.28-4.31 mediante líneas discontinuas.

Operario 1

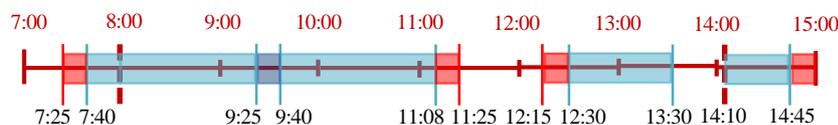


Figura 4. 28. Turno de trabajo del operario 1. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su jornada laboral a las 7:25 de la mañana. Antes de comenzar con sus tareas emplea 15 minutos en colocarse los EPIs oportunos para la manipulación de tochos y piezas. Entre otros, los más usados son guantes y botas de seguridad. Tras esto, el operario comienza a las 7:40 el aprovisionamiento de la célula con los tochos de material, para que a las 8:00 de comienzo la fabricación de las piezas dentro de la célula. Como ya se ha comentado anteriormente, durante la fabricación, el *operario 1* se posiciona al inicio de cinta donde va colocando los tochos correspondientes en los instantes de tiempo que se fijaron en las tablas 4.1 y 4.2. Tras colocar en la cinta la pieza B5, han transcurrido 1 hora y 25 minutos aproximadamente desde que se inició la fabricación, por lo que el operario dispone de 15 minutos de descanso (desde las 9:25 hasta las 9:40) antes de colocar la siguiente pieza en la cinta. A las 11:08 termina la colocación de las 20 piezas sobre la cinta, y tras 15 minutos empleados en quitarse los EPIs el operario abandona la célula. La recepción de tochos, que se da una vez cada dos meses, se realiza siempre entre las 12:30 y las 13:30 y 15 minutos antes de eso, el operario debe colocarse de nuevo los EPIs necesarios. La fabricación de las piezas acaba a las 14:10 y es en este instante cuando el operario se dirige al estante de piezas terminadas para colocarlas en su almacén y al estante de tochos, para devolver los que no han sido utilizados al almacén de tochos. Ambas tareas las realiza en 35 minutos. Finalmente, el operario emplea otros 15 minutos en quitarse y guardar los EPIs que ha estado utilizando, antes de abandonar su puesto de trabajo a las 15:00.

El turno completo de trabajo del *operario 1* en la célula es de 7 horas y 35 minutos. Cabe destacar que habitualmente, los días que no se realiza la recepción de tochos, el operario dispone de 2 h y 45 minutos (desde las 11:25 hasta las 14:10) para realizar otro tipo de tareas no relacionadas directamente con la fabricación de esta familia de piezas, como la limpieza y la gestión de la zona de almacenamiento.

Por otra parte, el segundo turno del día para el *operario 1* es completamente similar al representado en la figura 4.28, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 16:25 y finaliza a las 00:00.

Operario 2

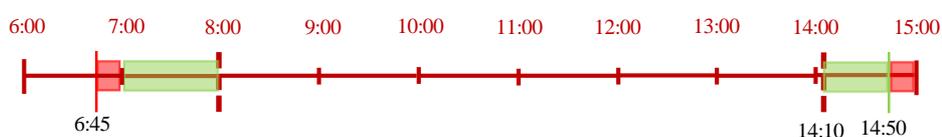


Figura 4. 29. Turno de trabajo del operario 2. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula trasladándolos desde el almacén hasta el estante intermedio de útiles de la célula. Al finalizar esta tarea, el operario procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Durante el proceso de fabricación el *operario 2* no permanece dentro de la célula mientras no se precisen labores de mantenimiento por roturas de equipos o averías. Este empleado encargado del mantenimiento y limpieza de espacios de trabajo pasa la mayor parte de su turno, en ausencia de averías, fuera de la célula participando en otras tareas como el diseño e implantación de planes y controles predictivos y preventivos de los procesos o controles de calidad de productos. En la figura 4.29 no se han detallado dichas actividades debido a que no están directamente relacionadas con el trabajo dentro de la célula. Los descansos, igualmente, serán proporcionales a la duración de las tareas que realice durante dicho período de tiempo.

Tras la fabricación de las 20 piezas que concluye a las 14:10, este operario se encarga de la limpieza general de la célula, tardando en ello 40 minutos. El tiempo necesario para quitarse y guardar los EPIs que ha empleado es de 15 minutos, por lo que finaliza su trabajo a las 15:00. Esto supone que el turno del *operario 2* es de aproximadamente 8 horas.

Al igual que en el caso del *operario 1*, el segundo turno del día para el operario 2 es muy similar al representado en la figura 4.29, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando el turno a las 15:45 y finalizando a las 00:00.

Operario 3

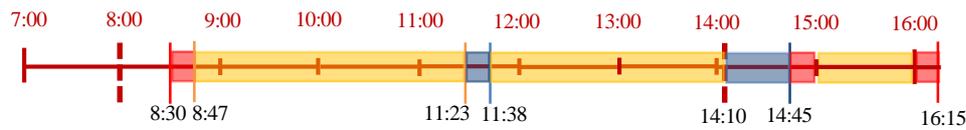


Figura 4. 30. Turno de trabajo del operario 3. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 3*, encargado del proceso de limpieza de las piezas y de la limpieza de todas las máquinas, comienza su turno diario a las 8:30 de la mañana, colocándose los EPIs oportunos para la manipulación de piezas manchadas de taladrina y de la solución de limpieza empleada en el proceso. Entre otros, los más comunes son los guantes, mascarillas y gafas de seguridad. Este operario comienza con la limpieza de piezas a las 8:47 y finaliza a las 14:10. Son 5 horas y 23 minutos los que este trabajador permanece dentro de la célula. Durante este tiempo, el *operario 3* dispone de un descanso de 15 minutos, entre las 11:23 y las 11:38. Este descanso tiene lugar mientras la producción de piezas sigue su curso; justo cuando el operario coloca en el estante anterior a la máquina de limpieza la segunda pieza del cuarto lote. De esta manera, tras el descanso el operario se incorpora a su trabajo cuando la tercera pieza del cuarto lote acaba la verificación y está lista para ser introducida en la máquina de limpieza junto a las demás piezas de su mismo lote. Este descanso puede ser sustituido o complementado con otro, siempre que sea necesario, tras la colocación de la segunda pieza de cada lote en el estante, ya que siempre se dispone de 15 minutos libres entre la segunda y la tercera pieza de cada lote. No obstante, el descanso establecido entre las horas indicadas en la figura 4.30 es el más adecuado, ya que se sitúa en torno a la mitad del tiempo que el operario pasa en su puesto de trabajo.

Por lo general, el *operario 3* finaliza su turno de trabajo a las 14:10. Sin embargo, una vez a la semana, se realiza la limpieza completa de máquinas y equipos de trabajo en la que es necesario retirar la cinta transportadora de material y el carril guía de los robots, para lo que se emplea una hora. En estas situaciones, al finalizar la limpieza de las piezas, el operario dispone de un descanso de 35 minutos para luego incorporarse de nuevo al trabajo a las 14:45. En ese momento, el operario se coloca los EPIs necesarios para llevar a cabo la limpieza de las máquinas y coge las herramientas y productos de limpieza que se precisan para llevar a cabo dicha tarea para iniciarla a las 15:00. Pasada una hora, el operario finaliza la tarea y concluye su turno de trabajo a las 16:15, tras quitarse y guardar los EPIs utilizados. Este turno de trabajo, incluyendo la limpieza semanal de una hora de duración, es de 7 horas y 45 minutos.

El segundo turno del día para el *operario 3* es también similar al representado en la figura 4.30, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 17:30 y finaliza a las 01:15.

Supervisor

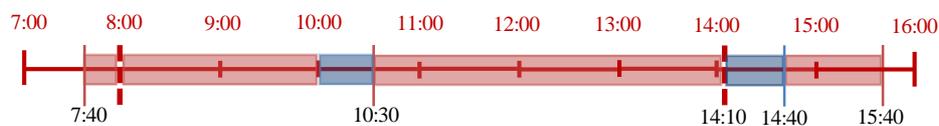


Figura 4. 31. Turno de trabajo del supervisor. Fuente: Elaboración propia.

El *supervisor* se encarga de controlar y comprobar el buen funcionamiento de cada tarea y operación dentro y fuera de la célula. Sus principales tareas son: el control del flujo regular de materiales, la inspección de defectos, la verificación de las normas de trabajo, la vigilancia de la seguridad en el trabajo, además de la supervisión del proceso de fabricación de piezas, de la recepción de material y de la puesta a punto y limpieza de las máquinas.

El turno completo de trabajo del supervisor es de 8 horas tal y como se muestra en la figura 4.31. Dicho turno cuenta con dos descansos de 30 minutos, uno desde las 10:00 hasta las 10:30, y otro de 14:10 a 14:40.

El segundo turno del día para el *supervisor* es similar al representado en la figura 4.31, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 16:40 y finaliza a las 00:40.

Diagrama de espagueti

En la figura 4.26 se mostraban los movimientos que durante cada tarea realizaban los operarios en la planta. En la figura 4.32, sin embargo, sólo se representan los movimientos asociados a la producción ideal de las 20 piezas, es decir, suponiendo que no se produzcan piezas defectuosas.

Los movimientos del *operario 1* se representan en color azul; los del *operario 2*, en verde y los del *operario 3*, en naranja. La secuencia de los movimientos son los correspondientes a las tareas detalladas en las líneas de tiempo de cada trabajador. Por otro lado, al igual que en la figura 4.26, los desplazamientos del supervisor no se incluyen en el diagrama, ya que éste se desplaza constantemente por la planta de fabricación, por lo que si se incluyeran todos sus movimientos, la visualización de los demás movimientos se vería entorpecida.

A modo de resumen se plantea la siguiente tabla en la que se asocian las tareas de cada operario con las líneas que representan sus movimientos en la figura 4.32, en el caso ideal de producción.

| Operario | Tarea | |
|----------|---|-------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ————— |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ————— |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ————— |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ————— |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ————— |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ————— |
| | Limpieza de la célula | ————— |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ————— |
| | Limpieza de las máquinas | ————— |

Tabla 4. 7. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 4.32. Fuente: Elaboración propia.

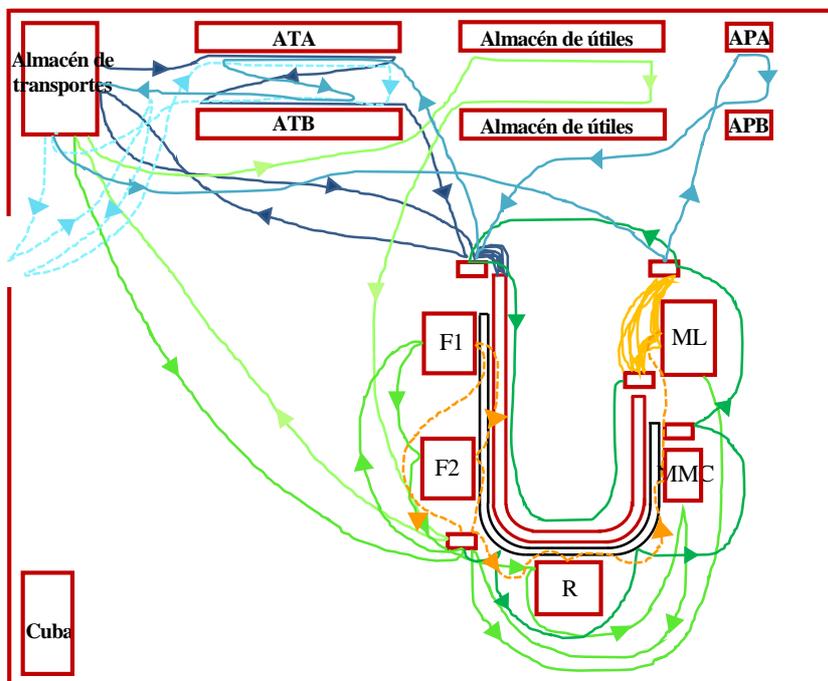


Figura 4. 32. Diagrama de espagueti de todos los movimientos de los operarios en la situación ideal de producción. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

4.2.7.1. Incidentes y tiempos asociados

Hasta el momento se ha analizado el tiempo necesario para la realización de cada tarea dentro y fuera de la célula y de los desplazamientos por la planta de fabricación. Sin embargo, en este estudio no se ha tenido en cuenta el hecho de que alguna pieza no cumpla con los requisitos de diseño y que, por consiguiente, tras la verificación en la máquina de medición de coordenadas, la pieza pueda ser desechada y se tenga que producir de nuevo. Asimismo se ha obviado el tiempo necesario que se emplearía en el caso de paradas de máquinas por averías y operaciones de reparación. A continuación se estima el tiempo requerido para cada una de estas situaciones que alejan al proceso productivo de la situación ideal, siguiendo el siguiente esquema.

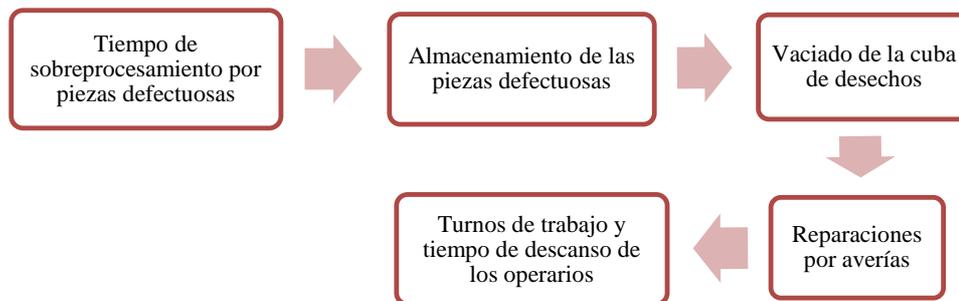


Figura 4. 33. Fases del estudio de tiempos cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia.

▪ Sobreprocesamiento por piezas defectuosas

El sobreprocesamiento es consecuencia de la fabricación de piezas con algún tipo de desperfecto en cuanto al diseño o a la calidad en cualquier operación durante su producción. Como ya se ha comentado en numerosas ocasiones, la máquina encargada de la verificación comprueba el cumplimiento de los requisitos y la ausencia de desperfectos en cada pieza y en caso de no pasar satisfactoriamente dicha comprobación, las piezas son desechadas y apartadas del proceso productivo. Para ello, tras concluir que una pieza debe ser desechada, el *robot 2* se dirige hacia el estante de piezas defectuosas situado junto a la máquina de medición de coordenadas y coloca la pieza en él. La producción seguirá su curso tal y como se mostraba en las tablas 4.1 y 4.2, sin ninguna variación.

Al finalizar la verificación de las primeras 20 piezas, el *operario 1* se dirige al estante de piezas defectuosas y comprueba cuántas piezas y de qué tipo han de producirse de nuevo por fallos o desperfectos durante la fabricación. Seguidamente se desplaza hacia el estante de tochos situado junto a la *fresadora 1*, en el que quedan 4 tochos de cada tipo de pieza, coge los tochos necesarios y vuelve a comenzar el proceso de fabricación hasta completar las 20 piezas. El tiempo que el *operario 1* emplea en desplazarse hacia el estante junto a la máquina de verificación, anotar las piezas defectuosas, desplazarse hacia el estante de tochos y colocar el primero sobre la cinta es de **10 minutos**.

Como máximo, en un turno de trabajo pueden producirse 4 piezas defectuosas, ya que debe procurarse que la eficiencia del proceso nunca sea inferior al 80 %. Como consecuencia de la combinación en número y tipo de piezas existen un total de 14 posibles secuencias o combinaciones de piezas que se deban volver a fabricar. A continuación se van a estimar el tiempo de sobreprocesamiento para los siguientes casos, siguiendo el procedimiento de las tablas A.1 – A.9 del Anexo A, similar al de las tablas 4.1 y 4.2.

- Una pieza defectuosa de tipo A. Volver a producir una sola pieza de tipo A es similar a fabricar la pieza A1 (tabla 4.1) sin la espera a la entrada de la rectificadora y sin la espera para completar un lote de piezas para la limpieza, por lo que se tardan **4546 segundos** (1 h 15 min 46 s) en volver a fabricar una sola pieza de tipo A.
- Una pieza defectuosa de tipo B. La nueva fabricación de una pieza de tipo B se lleva a cabo en **4246 segundos** (1 h 10 min 46 s), sin esperas de ningún tipo, al fabricarse una única pieza más (tabla A.3).
- Dos piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de dos piezas de tipo A conlleva un tiempo de **5791 segundos** (1 h 36 min 31 s), tal y como se muestra en la tabla A.1. A la entrada de la rectificadora no se produce espera de la segunda pieza, sin embargo, en la máquina de medición de coordenadas la primera

pieza verificada debe esperar a que se complete la verificación de la segunda para luego ser limpiadas simultáneamente.

- Dos piezas defectuosas de tipo B. Al igual que en el caso anterior, la fabricación de piezas del mismo tipo, sólo conlleva esperas en el proceso de limpieza hasta que se completa un lote. El tiempo de fabricación de estas dos nuevas piezas es de **5191 segundos** (1 h 26 min 31 s).
- Una pieza defectuosa de tipo A y otra de tipo B. La fabricación de una pieza de cada tipo es similar al procedimiento de fabricación de las piezas A1 y B1 de las tablas 4.1 y 4.2. El tiempo empleado para ello es de **5234 segundos** (1 h 27 min 14 s), tal y como se expone en la tabla A.5.
- Tres piezas defectuosas de tipo A. Volver a fabricar tres piezas de tipo A supone un tiempo adicional de **7036 segundos** (1 h 57 min 16 s).
- Tres piezas defectuosas de tipo B. Para fabricar tres piezas de tipo B se necesitan **6136 segundos** (1 h 42 min 16 s).
- Dos piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. La secuencia de entrada en la célula de estas tres piezas es ABA. El nuevo procedimiento detallado en la tabla A.6 concluye que son necesarios **6174 segundos** (1 h 43 min 19 s) para su obtención.
- Dos piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. La secuencia para las piezas en este caso es ABB y, según la tabla 4.5, se necesitan también **6174 segundos** para su fabricación.
- Cuatro piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de cuatro piezas conlleva la agrupación de piezas en dos lotes de dos piezas cada uno para el proceso de limpieza (ya que como máximo pueden introducirse 3 piezas al mismo tiempo). La tabla A.2 indica que el tiempo de fabricación es de **8281 segundos** (2 h 18 min 1 s).
- Cuatro piezas defectuosas de tipo B. Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso anterior, la tabla A.4 muestra un tiempo total de **7081 segundos** (1 h 58 min 1 s).
- Dos piezas defectuosas de tipo A y dos de tipo B. La secuencia de entrada a la célula de estas tres piezas es ABAB y es similar a la producción de las piezas A1, B1, A2 y B2 mostradas en las tablas 4.1 y 4.2. El procedimiento detallado en la tabla A.7 expone que se necesitan **7114 segundos** (1 h 58 min 34 s) para su obtención.
- Tres piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. Para estas piezas, la secuencia es ABAA y supone un tiempo de **7114 segundos**, igual al anterior caso (tabla A.8).
- Tres piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. Por último, si se requiere volver a fabricar esta combinación de piezas, la secuencia es AB BB, necesitando de igual forma **7114 segundos** (tabla A.9).

Tal y como se muestra en la tabla 4.1, en la fabricación de las primeras 20 piezas, la última pieza que sale de la máquina de medición de coordenadas es la pieza la A10. Tras su verificación, el *robot 2* la coloca en la cinta si ha superado dicho proceso o en el estante de piezas defectuosas en caso contrario. Hasta ese momento, habrán transcurrido 20604 segundos, 5 horas y 44 minutos aproximadamente, desde el inicio de la fabricación.

Puesto que la fabricación comienza a las 8:00 de la mañana, en el caso del primer turno, se tiene que el proceso de verificación de la última pieza concluye a las 13:44. Teniendo en cuenta que el *operario 1* tarda 10 minutos en realizar el recuento de piezas defectuosas y en desplazarse de nuevo al inicio de la célula para colocar en la cinta los tochos correspondientes, se determina que la fabricación de las nuevas piezas comience a las 14:00. En el caso del segundo turno, comenzaría a las 23:00.

En la tabla 4.8 se recogen todos los tiempos de sobreprocesamiento anteriores, necesarios para la fabricación de las nuevas piezas, según la secuencia de piezas que se necesite fabricar, así como la hora de comienzo y final, aproximadamente, en cada caso.

| Secuencia de piezas | Tiempo de sobreprocesamiento | | Comienzo de la fabricación | Hora final de la fabricación |
|---------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| A | 4546 s | 1 h 15 min 46 s | 14:00 | 15:16 |
| B | 4246 s | 1 h 10 min 46 s | | 15:11 |
| AA | 5791 s | 1 h 36 min 31 s | | 15:37 |
| BB | 5191 s | 1 h 26 min 31 s | | 15:27 |
| AB | 5234 s | 1 h 27 min 14 s | | 15:28 |
| AAA | 7036 s | 1 h 57 min 16 s | | 15:58 |
| BBB | 6136 s | 1 h 42 min 16 s | | 15:43 |
| ABA | 6174 s | 1 h 42 min 54 s | | 15:43 |
| ABB | | | | |
| AAAA | 8281 s | 2 h 18 min 1 s | | 16:18 |
| BBBB | 7081 s | 1 h 58 min 1 s | | 15:58 |
| ABAB | 7114 s | 1 h 58 min 34 s | | 15:59 |
| ABAA | | | | |
| ABBB | | | | |

Tabla 4. 8. Resumen de tiempos de sobreproducción y horas de comienzo y final de las secuencias de piezas. Fuente: Elaboración propia.

▪ Recuento de piezas defectuosas

Tras concluir la verificación de las 20 piezas, un operario se dirige hasta el estante de piezas defectuosas y anota el número y tipo de piezas que se han desechado, para tener constancia de cuantos tochos debe volver a colocar en la cinta y, por consiguiente, cuantos tochos deben ser devueltos de nuevo a su almacén. Esta tarea conlleva un total de **10 minutos**.

▪ Almacenamiento de piezas defectuosas

Tras concluir la fabricación de las nuevas piezas, completando así el conjunto de 20 piezas en un turno, un operario se dirige hacia el estante de piezas no conformes donde el *robot 2* las ha ido colocando durante la fabricación y mediante una carretilla manual las transporta hasta la cuba de desechos en la que se depositan las piezas que no pasan el proceso de verificación. La carga de piezas defectuosas en la carretilla, el transporte de éstas y la descarga en la cuba, sumado al doble desplazamiento del operario hasta el almacén de transporte para coger y dejar la carretilla, supone un tiempo de **15 minutos**.

▪ Vaciado de la cuba de desechos

La cuba de desechos posee una capacidad de 8 m³ lo que posibilita guardar una gran cantidad de material en su interior. Por otro lado, el contenido de esta cuba es totalmente metálico: piezas defectuosas, virutas y demás restos metálicos procedentes de la fabricación. Es por ambos aspectos por los que el vaciado de la cuba se decide realizar cada dos meses, coincidiendo con la recepción de tochos para que la misma empresa que los suministra se lleve el contenido de la cuba para su reutilización.

El vaciado se lleva a cabo manualmente por la empresa que suministra los tochos. De esta forma, una vez entregados los tochos al *operario 1*, varios trabajadores de dicha empresa se desplazan hacia la cuba, la vacían y se llevan su contenido. Esta operación se lleva a cabo en **20 minutos** y requiere la presencia del supervisor de la planta.

▪ Reparaciones por averías

Cualquier máquina, equipo de trabajo o sistema de transporte puede dejar de funcionar en un momento determinado por diversas razones. Las más comunes son el desgaste y la inadecuada utilización de la herramienta de trabajo. Estas paradas en las máquinas afectan al flujo normal de trabajo dentro y fuera de la célula, lo que ocasiona retrasos en la entrega del producto. La célula cuenta con controles periódicos de calidad y con operaciones de mantenimiento preventivo y predictivo, pero aun así se pueden producir paradas en la producción y averías imprevistas con cierta frecuencia. Resulta difícil concretar el tiempo necesario para hacer frente a este tipo de situaciones, ya que depende de la magnitud del daño ocasionado y de la disponibilidad de recursos para solucionarlo, por lo que el tiempo puede variar desde minutos hasta días.

Para solucionar este tipo de imprevistos se paraliza el proceso productivo en el momento de la detección del problema y hasta que se solucione. Estas tareas son llevadas a cabo por el *operario 2* durante el tiempo que habitualmente, como se mostraba en la figura 4.29, no tiene asignada ninguna tarea dentro de la célula, es decir, durante el período de tiempo de producción de las piezas.

▪ Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

Con la aparición de incidencias durante la producción de las piezas en la célula, ya sean averías de máquinas, operaciones de sobreprocesamiento causadas por piezas defectuosas u otros problemas, los turnos de trabajo de los operarios se ven modificados respecto a las figuras 4.28-4.31.

| Secuencia de piezas | Tiempo de trabajo | | | |
|---------------------|-------------------|----------------|------------|-----------------|
| | Operario 1 | | Operario 3 | |
| A | - | - | 1520 s | 25 min 20 s |
| B | - | - | | |
| AA | 1245 s | 20 min 45 s | 2765 s | 46 min 5 s |
| BB | 945 s | 15 min 45 s | 2465 s | 41 min 5 s |
| AB | 48 s | 48 s | 2460 s | 41 min |
| AAA | 2490 s | 41 min 30 s | 4010 s | 1 h 6 min 50 s |
| BBB | 1890 s | 31 min 30 s | 3410 s | 56 min 50 s |
| ABA | 1245 s | 20 min 45 s | 3400 s | 56 min 40 s |
| ABB | 993 s | 16 min 33 s | | |
| AAAA | 3735 s | 1 h 2 min 15 s | 5255 s | 1 h 27 min 35 s |
| BBBB | 2835 s | 47 min 15 s | 4355 s | 1 h 12 min 35 s |
| ABAB | 1293 s | 21 min 33 s | 4340 s | 1 h 12 min 20 s |
| ABAA | 2490 s | 41 min 30 s | | |
| ABBB | 1938 s | 32 min 18 s | | |

Tabla 4. 9. Tiempos de trabajo de los operarios durante la fabricación de las nuevas piezas. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.9 se registra, para cada caso y secuencia de piezas, el tiempo de trabajo que los *operarios 1* y *3* deben emplear en la fabricación de las nuevas piezas dentro de la célula. Dependiendo del número y tipo de piezas a fabricar nuevamente, la duración de la permanencia de cada operario en su puesto de trabajo en el interior de la célula será mayor o menor. En la tabla se muestran coloreadas las filas correspondientes a los tiempos mínimos y máximos de dicha permanencia. De esta forma, en el caso de tener que producir una sola pieza, el tiempo que el *operario 1* debería estar en su puesto de trabajo se reduce al instante de colocación del tocho correspondiente en la cinta. Sin embargo, el *operario 3* permanece junto en la máquina de limpieza desde que recoge dicha pieza tras la verificación hasta que concluye el proceso de limpieza, un total de 26 minutos, aproximadamente. Por otra parte, el tiempo máximo para ambos operarios se da en la situación de volver a producir cuatro piezas de tipo A, en la que el *operario 1* emplea 1 hora y 3 minutos en la colocación de las cuatro piezas en la cinta. El *operario 3* permanece en su puesto de trabajo 1 hora y 28 minutos, desde que recibe la primera pieza de tipo A hasta que concluye el proceso de limpieza de las cuatro y las coloca en el último estante antes de ser almacenadas.

Tal y como se hizo en el caso de la producción ideal o fabricación sin operaciones de sobreprocesamiento, en la tabla 4.10 se resumen todas las tareas, tanto si se realizan diariamente como si no (filas coloreadas), durante un turno de trabajo. En ella, se cuantifica la duración de cada tarea sin tener en cuenta los descansos de los operarios ni el tiempo empleado en ponerse los EPIs necesarios en las operaciones que lo requieran.

Una de las principales diferencias que se observan respecto a la producción ideal es la ausencia de las labores de limpieza, tanto de la célula como de las máquinas, tras la fabricación de las piezas. Esto es debido a que el tiempo adicional que los empleados deben emplear en las operaciones de sobreprocesamiento hace imposible incluir dichas labores de limpieza dentro del mismo turno. Por lo tanto, en los turnos donde se produzcan piezas defectuosas y, por consiguiente, operaciones de sobreprocesamiento, no se realiza la limpieza de la célula ni de las máquinas tras la fabricación.

Otra gran diferencia respecto a la situación ideal de producción es la asignación de la tarea de almacenamiento de piezas terminadas. Cuando no se producen piezas defectuosas, esta tarea es realizada por el *operario 1*, mientras que en el caso contrario la realiza el *operario 3* tras concluir el proceso de limpieza de las nuevas piezas.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|----------------------------------|----------------|------------|-----------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | - | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | - |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Colocación de tochos en la cinta | 3 h 7 min 33 s | - | - | 2 horas |
| | Limpieza de piezas | - | - | 5 h 23 min | |
| Recuento de piezas defectuosas | | 10 min | - | - | - |
| Sobreprocesamiento | Colocación de tochos en la cinta | 1 h 2 min 15 s | - | - | 1 hora |
| | Limpieza de piezas | - | - | 1 h 27 min 35 s | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | - | - | 20 min | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Almacenamiento de piezas defectuosas en cuba | | - | - | 15 min | - |
| Vaciado de la cuba de desechos | | - | - | - | 20 min |

Tabla 4. 10. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos recogidos en la tabla 4.10 se va a determinar el horario completo de cada trabajador durante el primer turno del día, incluyendo los descansos y la colocación de los equipos de protección necesarios, para el caso en que tengan que producirse cuatro piezas de tipo A. De esta forma se obtiene el turno de trabajo asociado a las tareas de mayor duración. El segundo turno es completamente similar. Para ello se representa mediante una línea de tiempo la duración de cada una de las tareas y se emplean los mismos colores que se utilizaron para los horarios durante la producción ideal: el rojo, para la colocación de los EPIs; el azul oscuro, para el tiempo de descanso; el azul, el verde, el naranja y el burdeos para los tiempos de trabajo del *operario 1*, el *operario 2*, el *operario 3* y el supervisor, respectivamente.

Operario 1

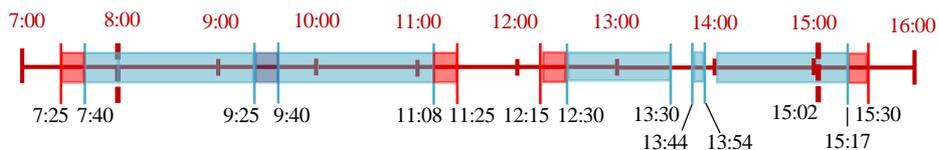


Figura 4. 34. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su jornada laboral a las 7:25 de la mañana. Antes de comenzar con sus tareas emplea 15 minutos en colocarse los EPIs oportunos para la manipulación de tochos y piezas. Entre otros, los más usados son guantes y botas de seguridad. Tras esto, el operario comienza a las 7:40 el aprovisionamiento de la célula con los tochos de material, para que a las 8:00 de comienzo la fabricación de las piezas dentro de la célula. Como ya se ha comentado anteriormente, durante la fabricación, el *operario 1* se posiciona al inicio de cinta donde va colocando los tochos correspondientes en los instantes de tiempo que se fijaron en las tablas 4.1 y 4.2. Tras colocar en la cinta la pieza B5, han transcurrido una hora y 25 minutos aproximadamente desde que se inició la fabricación, por lo que el operario dispone de 15 minutos de descanso (desde las 9:25 hasta las 9:40) antes de colocar la siguiente pieza en la cinta. A las 11:08 termina la colocación de las 20 piezas sobre la cinta, y tras 15 minutos empleados en quitarse los EPIs, el operario abandona la célula. La recepción de tochos, que se da una vez cada dos meses, se realiza siempre entre las 12:30 y las 13:30 y 15 minutos antes de eso, el operario debe colocarse de nuevo los EPIs necesarios.

La verificación de las primeras 20 piezas concluye a las 13:44, por lo que en ese instante el *operario 1* se dirige al estante de piezas defectuosas para realizar el recuento del número y tipo de piezas que se deben volver a fabricar, lo que le lleva un total de 10 minutos. Tras esto se dirige de nuevo al principio de la cinta transportadora de la célula, para iniciar la fabricación de las nuevas piezas, a las 14:00, con la colocación de los tochos correspondientes. Como máximo el operario permanecerá en dicho puesto hasta las 15:02, que es el tiempo que tarda en colocar los cuatro tochos de tipo A. En el caso de que la secuencia de piezas a fabricar sea otra cualquiera, el tiempo será menor. Por último, la tarea final de este operario es devolver los tochos no empleados a su almacén, para lo que emplea 15 minutos. Esta tarea finaliza a las 15:17, y tras 10 minutos aproximadamente que emplea en despojarse y guardar correctamente de los EPIs usados durante su turno, el *operario 1* finaliza su turno a las 15:30. Si la secuencia de piezas no fuese AAAA, el operario finalizaría el turno antes.

Por lo tanto, el turno completo de trabajo de este operario es de 8 horas aproximadamente. Cabe destacar que habitualmente, los días que no se realiza la recepción de tochos, el operario dispone de 2 horas y 19 minutos (desde las 11:25 hasta las 13:44) para realizar otro tipo de tareas no relacionadas directamente con la fabricación de esta familia de piezas, como la limpieza y la gestión de la zona de almacenamiento. Por otra parte, el segundo turno del día para el *operario 1* es completamente similar al representado en la figura 4.34, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 16:25 y finaliza a las 00:30.

Operario 2

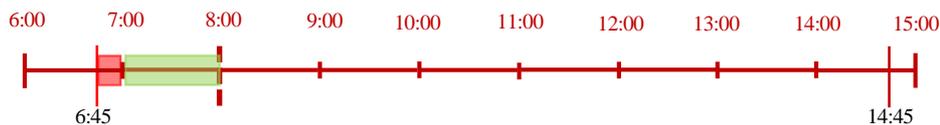


Figura 4. 35. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula trasladándolos desde el almacén hasta el estante intermedio de útiles de la célula. Al finalizar esta tarea, el operario procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Al igual que en la situación de fabricación ideal y por las mismas razones, durante el proceso de fabricación el *operario 2* no permanece dentro de la célula mientras no se precisen labores de mantenimiento por roturas de equipos o averías.

Por otra parte, al no realizarse las labores de limpieza de la célula en los turnos donde se producen piezas defectuosas, este operario no tiene ninguna tarea asignada adicional a las ya comentadas. Su turno de trabajo es de 8 horas, el cual finaliza a las 14:45. Durante dicho tiempo el operario se encarga de otras labores relacionadas indirectamente con la producción en la célula, por lo que no se detallan en la figura 4.35.

El segundo turno del día para el *operario 2* es muy similar al representado en la figura 4.35, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 15:45 y finalizando a las 23:45.

Operario 3

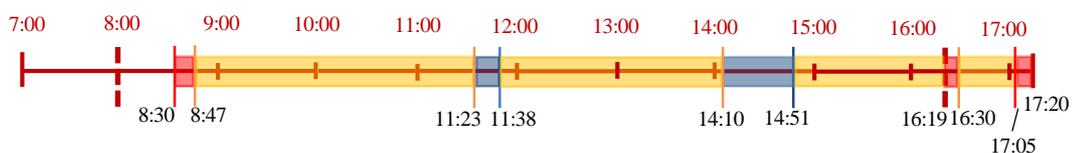


Figura 4. 36. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 3* comienza su turno diario a las 8:30 de la mañana colocándose los EPIs oportunos. La limpieza de piezas comienza a las 8:47 y finaliza antes de las 14:10, debido a que si se producen piezas defectuosas, éstas no llegan a someterse al proceso de limpieza. Dependiendo del número de piezas defectuosas que se produzcan el operario acabará la limpieza antes o después. Sin embargo, la diferencia de tiempo no es significativa, por lo que se va a suponer que acaba dicha tarea a las 14:10. Aproximadamente, son 5 horas los que este trabajador permanece dentro de la célula. Durante este tiempo, el *operario 3* dispone de un descanso de 15 minutos, entre las 11:23 y las 11:38. Este descanso tiene lugar mientras la producción de piezas sigue su curso, tal y como se describió para la fabricación ideal. Asimismo, dicho descanso puede ser sustituido o complementado con otro, ya que siempre se dispone de 15 minutos libres entre la segunda y la tercera pieza de cada lote.

Una vez iniciada la fabricación de las nuevas piezas, a las 14:00, la primera pieza verificada llega a manos del operario a las 14:51, lo que supone que anterior a eso el operario tiene un descanso de 51 minutos para la comida. Como máximo el operario permanece un total de 1 hora y 28 minutos realizando el proceso de limpieza, en el caso de producir 4 piezas de tipo A. Para cualquier otra secuencia de producción, esta tarea finalizará antes, concretamente a las horas indicadas en la quinta columna de la tabla 4.8. Tras concluir la limpieza de las piezas, el operario emplea 10 minutos en cambiarse los equipos de protección individuales para finalizar su turno de trabajo con el almacenamiento de las piezas fabricadas y el transporte de las piezas defectuosas hasta la cuba de desechos. Ambas tareas se realizan en 35 minutos.

El turno de trabajo de este operario finaliza como máximo a las 17:20, una vez haya guardado los EPIs empleados. El turno tiene una duración de aproximadamente 8 horas sin contar con el descanso de la comida. El segundo turno del día es similar al representado en la figura 4.36, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 17:30 y finaliza a las 02:20.

Supervisor

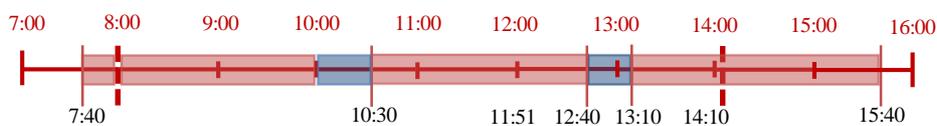


Figura 4. 37. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia.

El supervisor, apenas modifica su turno de trabajo respecto a los días en que no se producen piezas con defectos, ya que la duración de sus tareas no depende íntegramente de las operaciones de sobreprocesamiento. Como ya se comentó en el caso de producción ideal, el supervisor se encarga de controlar y comprobar el buen funcionamiento de cada tarea y operación dentro y fuera de la célula, siendo sus principales tareas: el control del flujo regular de materiales, la inspección de defectos, la verificación de las normas de trabajo, la vigilancia de la seguridad en el trabajo, además de la supervisión del proceso de fabricación de piezas, de la recepción de material y de la puesta a punto de las máquinas.

El turno completo de trabajo del supervisor es de 8 horas, tal y como se muestra en la figura 4.37, independientemente del número y tipo de piezas que han de fabricarse de nuevo. Dicho turno cuenta con dos descansos de 30 minutos; uno, desde las 10:00 hasta las 10:30, y otro, de 12:40 a 13:10. El segundo turno del día para el supervisor es similar al representado en la figura 4.37, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 16:40 y finalizando a las 00:40.

Diagrama de espagueti

En la figura 4.38 se representan los movimientos de los operarios de las tareas detalladas anteriormente en las líneas de tiempo de los turnos de cada trabajador cuando se producen piezas defectuosas.

En la tabla 4.11 se resumen y asocian las tareas de cada operario con la línea que representa los movimientos necesarios para la ejecución de las mismas en la figura 4.38, en el caso de producción con sobreprocesamiento.

| Operario | Tarea | |
|----------|---|-------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ===== |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas defectuosas en la cuba | ===== |

Tabla 4.11. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 4.38. Fuente: Elaboración propia.

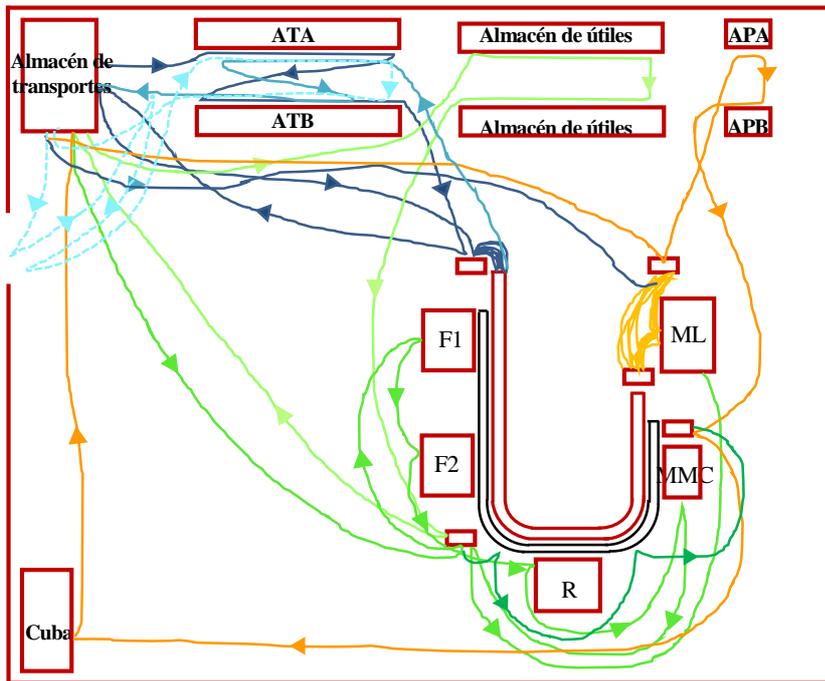


Figura 4.38. Diagrama de espagueti de todos los movimientos de los operarios cuando se producen piezas defectuosas. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F1, fresadora 1; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Necesidad de cambio

Aunque la célula de fabricación autónoma, objeto de estudio, tenga las principales características de la fabricación celular y de una célula de fabricación flexible no significa que posea las características de la fabricación Lean. Como ya se vio en el capítulo 3, la fabricación Lean se basa en la producción justo a tiempo (JIT) y en el sistema Pull desde el cliente. Hace uso del sistema Andon y del control visual para detectar y solventar problemas, así como de numerosos indicadores que muestran el estado actual y las anomalías en las distintas operaciones de un proceso. En la mejora de los métodos de fabricación son también importantes la estandarización de los procesos y el equilibrado de la línea de producción.

Esta célula autónoma de fabricación se limita a cumplir los requisitos del cliente en cuanto a cantidad y calidad de las piezas que se producen. Sin embargo, no cuenta con indicadores ni sistemas de control visual que hagan visible el seguimiento de la producción e informen a los empleados del estado de la producción en cada momento, por lo que la capacidad y rapidez de respuesta ante los problemas es muy inferior a la deseada.

Por otra parte, diariamente se generan numerosos desperdicios durante la producción que impiden la evolución hacia un sistema de fabricación eficiente. Dichos desperdicios son:

- Esperas y cuellos de botellas durante la fabricación de las piezas, debido a la diferente capacidad de producción que posee cada máquina.
- Numerosos y largos desplazamientos de operarios y materiales por la planta de fabricación.
- Defectos en el producto debido a su fabricación.
- Sobreprocesamiento debido al producto defectuoso.

Todos estos desperdicios incurren en un aumento del tiempo de producción y en sobrecostos asociados a:

- Desechar las piezas defectuosas, por lo que el dinero invertido en comprar los tochos correspondientes a dichas piezas se debe volver a invertir en nuevos tochos.
- Gastar más energía debido al funcionamiento extra de las máquinas durante las operaciones de sobreprocesamiento.
- Retrasos en la producción.

La necesidad de eliminar dichos desperdicios y de evolución hacia un sistema de fabricación eficaz y eficiente hace imprescindible el uso de las técnicas Lean. Por ello, en el capítulo 5 se proponen desde la filosofía Lean diversas alternativas de célula de fabricación para reducir los desperdicios encontrados en esta situación inicial.

5 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS LEAN

El fracaso es la oportunidad de empezar de nuevo, pero más inteligentemente.

- Henry Ford -

La aplicación de las técnicas y herramientas Lean a la planta de fabricación puede conllevar la modificación de las instalaciones, tanto de la configuración de la célula como del layout de la propia planta. El objetivo en este capítulo es hallar una solución basada en la reducción de los desperdicios generados en el sistema productivo de la célula propuesta en la situación inicial. Para ello se van a plantear varias alternativas en las que se modifica la configuración de la planta en cualquiera de sus aspectos (ubicación de almacenes, layout de la célula, adquisición de nueva maquinaria, etc.) y para las que se efectúa un estudio similar al realizado en el capítulo anterior: tiempos de fabricación, desplazamientos de los operarios, turnos de trabajo, desperdicios generados, etc. Una vez estudiadas todas las propuestas se elegirá la más idónea, desde la metodología Lean Manufacturing, para su implantación como nuevo sistema productivo.

5.1. Alternativas para la reducción de desperdicios

Para reducir los despilfarros observados en la situación inicial de la célula se van a proponer tres alternativas que, desde la filosofía Lean Manufacturing, resultan ser las más idóneas para la reducción de las esperas de las piezas dentro de la célula y los desperdicios por desplazamientos de operarios y movimientos innecesarios de material por la planta de fabricación.

5.1.1. Alternativa 1: duplicación de máquina

Uno de los principales desperdicios observados durante el proceso de fabricación son las esperas producidas a la entrada de la rectificadora tras el fresado de las piezas. Como ya se comentó en el capítulo anterior, el tiempo no productivo de las piezas supone, en media, un 54 % del tiempo total que cada pieza permanece dentro de la célula. Esto se traduce a que en torno a la mitad del tiempo que la pieza está dentro de la célula, no se está realizando ninguna operación sobre ella, siendo el tiempo de espera a la entrada de la rectificadora la contribución más importante al tiempo no productivo total.

Como solución a la reducción de estos desperdicios se propone la duplicación de maquinaria. En este caso, conviene duplicar la rectificadora, colocando una a continuación de cada fresadora, y disponer de otro robot para la manipulación de piezas en la cinta. Ambas rectificadoras tienen las mismas prestaciones, por lo que las dos poseen una capacidad de 4 piezas/hora. De esta forma dentro de la célula se tienen 6 máquinas (dos fresadoras, dos rectificadoras, una máquina de medición de coordenadas y una máquina de limpieza), y tres robots. La disposición de las máquinas dentro de la célula se muestra en la figura 5.1.

El área ocupada por las máquinas y los almacenes intermedios es el mismo que el descrito para la situación inicial: las fresadoras y las rectificadoras ocupan un área de 2.5x2 m²; la máquina de medición de coordenadas, 2x1.5 m²; la máquina de limpieza, 3x2 m²; los almacenes intermedios, 1x0.5 m². Las máquinas se separan unas de otras 2.5 metros, excepto la fresadora 2 y la rectificadora 2, que entre ellas existe una distancia de 2.4 metros.

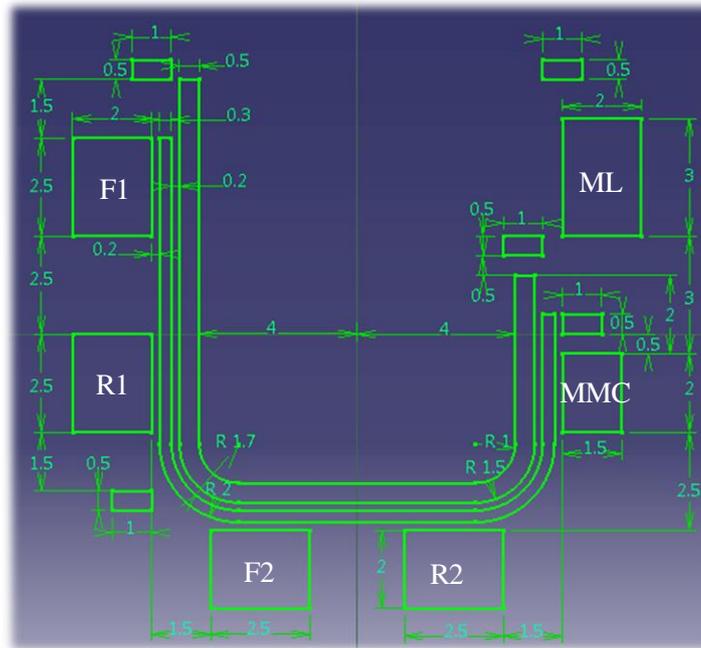


Figura 5. 1. Nuevo layout de la célula como primera alternativa a la situación inicial. F1, fresadora 1; R1, rectificadora 1; F2, fresadora 2; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

Al aumentar el número de máquinas, se incrementa el espacio ocupado por la célula en la planta de fabricación, siendo éste de $14.4 \times 14 \text{ m}^2$ respecto a los $11.5 \times 14 \text{ m}^2$ de la célula de la situación inicial. Los 14.4 metros es la distancia de los puntos exteriores de las máquinas enfrentadas, es decir, la distancia entre las partes posteriores de la *fresadora 1* y de la máquina de limpieza. Los 14 metros de longitud corresponden a la distancia entre las caras exteriores de los estantes de tochos y piezas y la parte posterior de la *fresadora 2* y la *rectificadora 2*. Esto conlleva a que la distancia que las piezas recorren sobre la cinta y la que recorren los robots sobre el carril guía sea también mayor. La longitud de la cinta transportadora es de 23.5 metros aproximadamente, y la del carril guía, de 22.9 metros, frente a los 20.6 y 20 metros, respectivamente, que medían en la situación inicial.

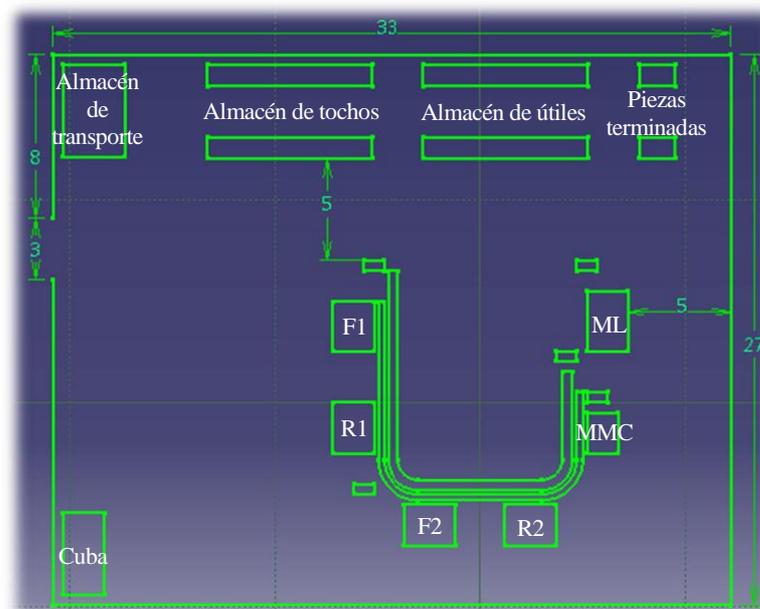


Figura 5.2. Situación de la célula con duplicación de maquinaria en la planta de fabricación. F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R1, rectificadora 1; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el aumento de máquinas en la célula supone también la necesidad de aumentar el número de robots que realicen las tareas de manipulación de piezas y alimentación de las máquinas. Por ello se introduce un tercer robot de iguales características a los dos que ya formaban parte del conjunto.

En la figura 5.2 se muestra la posición de la célula respecto a la instalación de la planta de fabricación. La distancia existente entre la célula y los almacenes es de 5 metros, al igual que su distancia a la pared derecha de la planta. De la pared inferior dista aproximadamente 3 metros y finalmente, 13.6 metros son los que separan la célula de la pared izquierda, en la que se sitúa la entrada a la fábrica.

5.1.1.1. Tiempos de fabricación

Con la duplicación de máquinas, la fabricación dentro de la célula es la única etapa del proceso de fabricación total que se modifica, por lo que la recepción y almacenamiento de tochos y piezas, el aprovisionamiento de la célula, la puesta a punto de las máquinas y la limpieza de la célula no se ven modificados, empleando el mismo tiempo que se especificó en la situación inicial.

En las tablas 5.1 y 5.2 se cuantifican de nuevo los tiempos empleados en cada operación o movimiento dentro de la célula y en un turno de trabajo, incluyendo las nuevas máquinas. El método empleado para el cálculo de los tiempos es semejante al de las tablas 4.1 y 4.2, sin embargo, existen ciertas diferencias respecto al caso descrito en la situación inicial:

- El *robot 1* se mueve entre la *fresadora 1* y la *rectificadora 1*; el *robot 2*, entre la *fresadora 2* y la *rectificadora 2*; el *robot 3*, entre la máquina de medición de coordenadas, el estante de piezas desechadas y el final de la cinta.
- La longitud de cinta recorrida por las piezas es diferente al existir una máquina más en la célula, por lo que los tiempos mostrados en la tercera columna de las tablas varían respecto a la situación inicial.
- Las piezas de tipo A se mecanizan en la *fresadora 1* y la *rectificadora 1*, mientras que las piezas de tipo B lo hacen en la *fresadora 2* y en la *rectificadora 2*. Todas ellas concluyen la fabricación en las máquinas de verificación y de limpieza.
- La secuencia de entrada de las piezas no se modifica, siendo: A1, B1, B2, A2, B3, A3, B4, A4, B5, B6, A5, B7, A6, B8, A7, B9, B10, A8, A9, A10.

Una vez colocados los tochos iniciales en el estante situado a la entrada de la célula, el *operario 1* inicia el proceso colocando el primer tocho de tipo A, A1, en la cinta. Todas las piezas posteriores a la primera, de ambos tipos, asumen un tiempo de espera hasta ser colocadas en la cinta, que en este caso coincide con el de la situación inicial para las piezas de tipo A. En este caso la distancia que recorren las piezas de tipo A, desde su entrada a la cinta hasta la posición del *robot 1* centrado en la *fresadora 1*, sigue siendo de 2.75 m y tarda en recorrerse 28 segundos. El *robot 1* recoge la pieza de tipo A y la introduce en la *fresadora 1* tardando en dicho movimiento 20 segundos.

Por otra parte, a los 5 segundos de introducir el tocho A1, el operario coloca el primer tocho de tipo B, B1. Las piezas de tipo B recorren una distancia de 11.8 m desde su entrada a la cinta hasta la *fresadora 2*, para lo que se tardan 118 s en recorrerla. El *robot 2*, posicionado en el centro de la *fresadora 2*, en el segundo 123, recoge la pieza B1 de la cinta y la introduce en dicha máquina tardando 20 s en el movimiento. Tras 15 minutos de fresado, la pieza B1 sale de la *fresadora 1* en el segundo 1043, mientras que la pieza A1 finaliza el fresado, de 20 minutos de duración, en el segundo 1248. Los respectivos robots recogen las piezas A1 y B1 de dichas máquinas y en los instantes antes indicados y las colocan de nuevo en la cinta, tardando en ello 20 segundos.

Seguidamente las piezas A1 y B1 y los *robots 1* y *2* se dirigen hacia las *rectificadoras 1* y *2*, respectivamente. Las piezas de tipo A recorren 5 metros hasta la rectificadora y tardan 50 segundos, mientras que las piezas de tipo B recorren 4.9 metros en 49 segundos. Una vez llegadas a las rectificadoras, introducen las piezas en su interior, tardando en ello 20 segundos y, tras 15 minutos de procesado, las devuelven a la cinta para que puedan dirigirse hasta la máquina de medición de coordenadas. Las piezas de tipo A recorren 12.8 metros hasta dicha máquina en 128 segundos, mientras que las de tipo B recorren 3.8 m en 38 segundos.

| Movimiento/proceso | Distancia | Tiempos | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|-------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 1245 | 2490 | 3735 | 4980 | 6225 | 7470 | 8715 | 9960 | 11205 |
| Entrada cinta-robot 1 | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 | 3735/3763 | 4980/5008 | 6225/6253 | 7470/7498 | 8715/8743 | 9960/9988 | 11205/11233 |
| Robot 1-fresadora 1 | - | 20 s | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 | 3763/3783 | 5008/5028 | 6253/6273 | 7498/7518 | 8743/8763 | 9988/10008 | 11233/11253 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 | 3783/4983 | 5028/6228 | 6273/7473 | 7518/8718 | 8763/9963 | 10008/11208 | 11253/12453 |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 | 4983/5003 | 6228/6248 | 7473/7493 | 8718/8738 | 9963/9983 | 11208/11228 | 12453/12473 |
| Cinta-robot 1 | 5 m | 50 s | 1268/1318 | 2513/2563 | 3758/3808 | 5003/5053 | 6248/6298 | 7493/7543 | 8738/8788 | 9983/10033 | 11228/11278 | 12473/12523 |
| Robot 1-rectificadora 1 | - | 20 s | 1318/1338 | 2563/2583 | 3808/3828 | 5053/5073 | 6298/6318 | 7543/7563 | 8788/8808 | 10033/10053 | 11278/11298 | 12523/12543 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 2583/3483 | 3828/4728 | 5073/5973 | 6318/7218 | 7563/8463 | 8808/9708 | 10053/10953 | 11298/12198 | 12543/13443 |
| Rectificadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 3483/3503 | 4728/4748 | 5973/5993 | 7218/7238 | 8463/8483 | 9708/9728 | 10953/10973 | 12198/12218 | 13443/13463 |
| Cinta-robot 3 | 12.8 m | 128 s | 2258/2386 | 3503/3631 | 4748/4876 | 5993/6121 | 7238/7366 | 8483/8611 | 9728/9856 | 10973/11101 | 12218/12346 | 13463/13591 |
| Espera | | | 2386/2730 | 3631/4010 | 4876/5290 | 6121/7210 | 7366/8490 | 8611/9770 | 9856/11690 | 11101/12970 | 12346/13610 | 13591/14250 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 4010/4030 | 5290/5310 | 7210/7230 | 8490/8510 | 9770/9790 | 11690/11710 | 12970/12990 | 13610/13630 | 14250/14270 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 4030/4630 | 5310/5910 | 7230/7830 | 8510/9110 | 9790/10390 | 11710/12310 | 12990/13590 | 13630/14230 | 14270/14870 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 4630/4650 | 5910/5930 | 7830/7850 | 9110/9130 | 10390/10410 | 12310/12330 | 13590/13610 | 14230/14250 | 14870/14890 |
| Cinta-operario 3 | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 4650/4680 | 5930/5960 | 7850/7880 | 9130/9160 | 10410/10440 | 12330/12360 | 13610/13640 | 14250/14280 | 14890/14920 |
| Espera lote | | | 3400/4040 | 4680/5960 | - | - | 9160/9800 | 10440/11720 | 12360/13640 | - | 14280/14920 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4040/4060 | 5960/5980 | 5960/5980 | 7880/7900 | 9800/9820 | 11720/11740 | 13640/13660 | 13640/13660 | 14920/14940 | 14920/14940 |
| Limpieza | - | 20 min | 4060/5260 | 5980/7180 | 5980/7180 | 7900/9100 | 9820/11020 | 11740/12940 | 13660/14860 | 13660/14860 | 14940/16140 | 14940/16140 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5260/5560 | 7180/7480 | 7180/7480 | 9100/9400 | 11020/11320 | 12940/13240 | 14860/15160 | 14860/15160 | 16140/16440 | 16140/16440 |

Tabla 5. 1. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A en la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Distancia | Tiempos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|-------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|
| Espera-cinta | | - | 5 | 950 | 1895 | 2840 | 3785 | 4730 | 5675 | 6620 | 7565 | 8510 |
| Entrada cinta-robot | 11.8 m | 118 s | 5/123 | 950/1068 | 1895/2013 | 2840/2958 | 3785/3903 | 4730/4848 | 5675/5793 | 6620/6738 | 7565/7683 | 8510/8628 |
| Robot 2-fresadora 2 | - | 20 s | 123/143 | 1068/1088 | 2013/2033 | 2958/2978 | 3903/3923 | 4848/4868 | 5793/5813 | 6738/6758 | 7683/7703 | 8628/8648 |
| Fresado | - | 15 min | 143/1043 | 1088/1988 | 2033/2933 | 2978/3878 | 3923/4823 | 4868/5768 | 5813/6713 | 6758/7658 | 7703/8603 | 8648/9548 |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 1043/1063 | 1988/2008 | 2933/2953 | 3878/3898 | 4823/4843 | 5768/5788 | 6713/6733 | 7658/7678 | 8603/8623 | 9548/9568 |
| Cinta-robot 2 | 4.9 m | 49 s | 1063/1112 | 2008/2057 | 2953/3002 | 3898/3947 | 4843/4892 | 5788/5837 | 6733/6782 | 7678/7727 | 8623/8672 | 9568/9617 |
| Robot 2-rectificadora 2 | - | 20 s | 1112/1132 | 2057/2077 | 3002/3022 | 3947/3967 | 4892/4912 | 5837/5857 | 6782/6802 | 7727/7747 | 8672/8692 | 9617/9637 |
| Rectificado | - | 15 min | 1132/2032 | 2077/2977 | 3022/3922 | 3967/4867 | 4912/5812 | 5857/6757 | 6802/7702 | 7747/8647 | 8692/9592 | 9637/10537 |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 2032/2052 | 2977/2997 | 3922/3942 | 4867/4887 | 5812/5832 | 6757/6777 | 7702/7722 | 8647/8667 | 9592/9612 | 10537/10557 |
| Cinta-robot 3 | 3.8 m | 38 s | 2052/2090 | 2997/3035 | 3942/3980 | 4887/4925 | 5832/5870 | 6777/6815 | 7722/7760 | 8667/8705 | 9612/9650 | 10557/10595 |
| Espera | | | - | 3035/3370 | 3980/4650 | 4925/5930 | 5870/6570 | 6815/7850 | 7760/9130 | 8705/10410 | 9650/11050 | 10595/12330 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2090/2110 | 3370/3390 | 4650/4670 | 5930/5950 | 6570/6590 | 7850/7870 | 9130/9150 | 10410/10430 | 11050/11070 | 12330/12350 |
| Verificación | - | 10 min | 2110/2710 | 3390/3990 | 4670/5270 | 5950/6550 | 6590/7190 | 7870/8470 | 9150/9750 | 10430/11030 | 11070/11670 | 12350/12950 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 2710/2730 | 3990/4010 | 5270/5290 | 6550/6570 | 7190/7210 | 8470/8490 | 9750/9770 | 11030/11050 | 11670/11690 | 12950/12970 |
| Cinta-operario 3 | 3 m | 30 s | 2730/2760 | 4010/4040 | 5290/5320 | 6570/6600 | 7210/7240 | 8490/8520 | 9770/9800 | 11050/11080 | 11690/11720 | 12970/13000 |
| Espera lote | | | 2760/4040 | - | 5320/5960 | 6600/ | 7240/ | 8520/9800 | - | 11080/11720 | - | 13000/13640 |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4040/4060 | 4040/4060 | 5960/5980 | 7880/7900 | 7880/7900 | 9800/9820 | 9800/9820 | 11720/11740 | 11720/11740 | 13640/13660 |
| Limpieza | - | 20 min | 4060/5260 | 4060/5260 | 5980/7180 | 7900/9100 | 7900/9100 | 9820/11020 | 9820/11020 | 11740/12940 | 11740/12940 | 13660/14860 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5260/5560 | 5260/5560 | 7180/7480 | 9100/9400 | 9100/9400 | 11020/11320 | 11020/11320 | 12940/13240 | 12940/13240 | 14860/15160 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | 16440 s = 4 h 34 min |

Tabla 5. 2. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B en la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El *robot 3*, colocado en el centro de esta máquina, recibe la primera pieza, B1, en el segundo 2090, la coge y la posiciona en dicha máquina, tardando 20 s. Tras la verificación de 10 minutos, el robot coloca la pieza B1 en la cinta en el segundo 2730 y en ese instante coge la siguiente pieza, A1, y la introduce en la misma máquina. Esto conlleva que todas las piezas, excepto la primera, pasan un tiempo paradas a la entrada de la máquina de medición de coordenadas, como se muestra en las casillas amarillas de las tablas 5.1 y 5.2; las piezas van entrando en la máquina en el mismo orden que llegan.

Por su parte la pieza B1 recorre 3 metros en 30 segundos desde que el *robot 3* la colocó en la cinta tras la verificación hasta que llega a manos del operario en el segundo 2760, el cual la sitúa en el estante ubicado al final de la cinta. En este estante debe esperar hasta que se complete un lote de 3 piezas, para ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza. Después de 10 minutos de verificación de la pieza A1, en el instante 3350, el *robot 2* la coloca en la cinta y la pieza, tras 30 segundos, es colocada en el estante por el operario en el segundo 3400.

Este es el recorrido al que se someten las piezas A1 y B1 durante el proceso. Ahora es conveniente determinar el instante en el que se colocan las demás piezas en la cinta para sufrir el mismo proceso. Es evidente, que no debe entrar en la cinta una tercera pieza hasta que los *robots 1* y *2* no hayan concluido la manipulación de las piezas A1 y B1 durante el fresado. Como se indica en la tabla 5.1, el robot acaba el posicionamiento de la pieza A1 en la cinta tras el fresado en el segundo 1268. Por otra parte, la pieza A2, tarda en llegar al robot 28 segundos. Por ello, se decide introducir la pieza A2 en la cinta 23 segundos antes de que el robot posicione la pieza A1 en la cinta tras el fresado, para que la pieza A2 llegue al robot 5 segundos después de eso, y el robot tenga tiempo de moverse para coger la pieza. Esto mismo pasa con las demás piezas de tipo A. Por la misma razón, las piezas de tipo B posteriores se colocan en la cinta 113 segundos antes de que el robot posicione la pieza anterior de tipo B en la cinta, tras el fresado. De esta manera se van completando todas las casillas de las tablas.

La limpieza se lleva a cabo de forma manual por el operario en lotes de 3 piezas, por lo que las piezas 1 y 2 de cada lote deben esperar 1280 y 640 segundos, respectivamente, hasta que la tercera pieza del lote llegue al estante y puedan ser introducidas en la máquina de limpieza. Una vez llegue la última pieza de cada lote al estante, el operario las lleva hasta la máquina y las introduce junto a la solución de limpieza y acciona el botón de la máquina para que comience el proceso, tardando en ello 20 segundos. Pasados 20 minutos, el operario tarda 5 minutos en extraer las piezas de la máquina de limpieza y en colocarlas, una vez secas, en el estante situado junto a la máquina.

Conclusiones

- La secuencia de salida de las piezas de la máquina de verificación y, por tanto, el orden de entrada en la máquina de limpieza es: B1, A1, B2, A2, B3, A3, B4, B5, A4, B6, A5, B7, A6, B8, B9, A7, B10, A8, A9, A10.
- En la siguiente tabla se muestra cada cuanto tiempo sale una pieza procesada de cada máquina.

| | Fresadora 1 | Fresadora 2 | Rectificadora 1 | Rectificadora 2 | Máquina de verificación | Máquina de limpieza |
|--------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| Tiempo | 1245 s (20 min 45 s) | 945 s (15 min 45 s) | 1245 s (20 min 45 s) | 945 s (15 min 45 s) | 640 s (10 min 40 s) | 1920 s (32 min) |

Tabla 5. 3. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, cada 21 minutos aproximadamente sale una pieza fresada de la *fresadora 1* y otra de la *rectificadora 1*; cada 16 minutos, de la *fresadora 2* y de la *rectificadora 2*; cada 11 minutos sale una pieza de la máquina de medición de coordenadas; y de la máquina de limpieza sale un lote cada 32 minutos. En total se introducen 6 lotes de 3 piezas y un lote de 2 piezas en la máquina de limpieza y las piezas que los forman son: B1-A1-B2, A2-B3-A3, B4-B5-A4, B6-A5-B7, A6-B8-B9, A7-B10-A8, A9-A10.

- El tiempo total de fabricación es de **16440 segundos** o, en otras palabras, **4 horas y 34 minutos**. Comparando este resultado con el obtenido en la fabricación sin duplicación de maquinaria, se consigue una reducción de 5714 segundos respecto a la fabricación en la célula de la situación inicial, esto es, se reduce 1 hora y 35 minutos aproximadamente el tiempo de fabricación.

Esperas

El fin último de la duplicación de la máquina rectificadora es la eliminación del tiempo que las piezas permanecían a la espera del rectificado a la entrada a la máquina en la situación inicial. Sin embargo, se generan nuevas esperas a la entrada de la máquina de verificación. Mediante esta propuesta, se reduce tanto el tiempo de fabricación dentro de la célula como el tiempo asociado a dichas esperas, ya que el tiempo que deben esperar las piezas a ser verificadas es menor al que debían esperar para ser rectificadas en la situación inicial. En la siguiente tabla se cuantifican, haciendo uso de las tablas 5.1 y 5.2 y de igual forma que se hizo para la situación inicial, los tiempos no productivos y las esperas durante el paso de cada pieza por la célula.

| Piezas | Entrada en la cinta | Entrada en la MMC | Lote limpieza | Movimientos en la cinta | Manipulación robot/operario | Total por pieza |
|--------|---------------------|-------------------|---------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| A1 | 0 | 344 | 640 | 236 | 440 | 1660 |
| B1 | 5 | 0 | 1280 | 235 | | 1960 |
| A2 | 1245 | 379 | 1280 | 236 | | 3580 |
| B2 | 950 | 335 | 0 | 235 | | 1960 |
| A3 | 2490 | 414 | 0 | 236 | | 3580 |
| B3 | 1895 | 670 | 640 | 235 | | 3880 |
| A4 | 3735 | 1089 | 0 | 236 | | 5500 |
| B4 | 2840 | 1005 | 1280 | 235 | | 5800 |
| A5 | 4980 | 1124 | 640 | 236 | | 7420 |
| B5 | 3785 | 700 | 640 | 235 | | 5800 |
| A6 | 6225 | 1159 | 1280 | 236 | | 9340 |
| B6 | 4730 | 1035 | 1280 | 235 | | 7720 |
| A7 | 7470 | 1834 | 1280 | 236 | | 11260 |
| B7 | 5675 | 1370 | 0 | 235 | | 7720 |
| A8 | 8715 | 1869 | 0 | 236 | | 11260 |
| B8 | 6620 | 1705 | 640 | 235 | | 9640 |
| A9 | 9960 | 1264 | 640 | 236 | | 12540 |
| B9 | 7565 | 1400 | 0 | 235 | | 9640 |
| A10 | 11205 | 659 | 0 | 236 | | 12540 |
| B10 | 8510 | 1735 | 640 | 235 | | 11560 |

Tabla 5. 4. Tiempos (en segundos) no productivos y esperas durante la fabricación con duplicación de maquinaria.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera columna se anotan por orden de entrada en la célula los tochos de material que tras la fabricación dan lugar a las distintas piezas. En la segunda se anota el tiempo que cada pieza permanece a la espera de ser colocada en la cinta desde el inicio de la fabricación. Tras 11205 segundos (3 horas, 6 minutos y 45 segundos) todos los tochos se encuentran ya en el interior de la célula.

Tras los procesos de fresado y rectificado, las piezas mecanizadas de ambos tipos se dirigen hacia la máquina de medición de coordenadas para comprobar si el mecanizado se ha hecho satisfactoriamente. En la tercera columna se anota el tiempo de espera de cada pieza a la espera de ser verificada. El máximo se da para la pieza A8 con 1869 segundos (31 minutos, 9 segundos) de espera.

En la cuarta columna se refleja el tiempo que cada pieza espera hasta completar un lote de tres piezas para ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza. La primera pieza de cada lote espera un total de 1280 segundos (21 minutos 20 segundos) y la segunda, 640 segundos (10 minutos, 40 segundos). En el último lote compuesto por las dos últimas piezas, A9 y A10, la primera pieza en llegar espera 640 segundos.

En la quinta y sexta columnas se registra el tiempo no productivo empleado en el movimiento de las piezas en la cinta de una máquina a otra y en la manipulación de las mismas a manos de algún operario o robot. De esta forma, se calcula que todas las piezas de tipo A pasan un total de 236 segundos (3 minutos, 56 segundos) sobre la cinta transportadora, mientras que las piezas de tipo B requieren de 235 segundos, ya que la separación entre la fresadora 2 y la rectificadora 2 es de 2.4 metros y no de 2.5 metros como en el resto de máquinas. Por otro lado, todas las piezas pasan 440 segundos (7 minutos, 20 segundos) en operaciones de manipulación.

El total de tiempo que sobre las piezas no se está realizando ninguna operación se anota en la última columna, siendo el máximo 12540 segundos (3 horas y 29 minutos) para la pieza A10.

En la tabla 5.5 se refleja además el porcentaje que suponen estos tiempos no productivos respecto al tiempo total que permanece la pieza en el interior de la célula (desde que son colocadas en la cinta hasta que termina el proceso de limpieza y se sitúan en el estante junto a esta máquina).

| Piezas | Tiempo total en la célula (cinta-fin de limpieza) | Esperas y tiempo no productivo | Esperas y tiempo no productivo (%) |
|--------|---|--------------------------------|------------------------------------|
| A1 | 5560 | 1660 | 30 |
| B1 | 5555 | 1955 | 35 |
| A2 | 6235 | 2335 | 37 |
| B2 | 4610 | 1010 | 22 |
| A3 | 4990 | 1090 | 22 |
| B3 | 5585 | 1985 | 35 |
| A4 | 5665 | 1765 | 31 |
| B4 | 6560 | 2960 | 45 |
| A5 | 6340 | 2440 | 38 |
| B5 | 5615 | 2015 | 36 |
| A6 | 7015 | 3115 | 44 |
| B6 | 6590 | 2990 | 45 |
| A7 | 7690 | 3790 | 49 |
| B7 | 5645 | 2045 | 36 |
| A8 | 6445 | 2545 | 39 |
| B8 | 6620 | 3020 | 46 |
| A9 | 6480 | 2580 | 40 |
| B9 | 5675 | 2075 | 36 |
| A10 | 5235 | 1335 | 26 |
| B10 | 6650 | 3050 | 46 |
| Media | 6038 | 2288 | 37 |

Tabla 5. 5. Comparativa del tiempo (en segundos) que cada pieza permanece en la célula con duplicación de maquinaria durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia.

El tiempo medio que una pieza permanece en la célula es de 6038 segundos (1 hora 40 minutos 38 segundos). Este tiempo varía de una pieza a otra debido principalmente al cuello de botella a la entrada de la máquina de medición de coordenadas. El tiempo medio de espera y manipulación de las piezas es de 2288 segundos (38 minutos y 8 segundos). Esto supone que del tiempo total en el que las piezas están dentro de la célula, en torno al 37 % de media están paradas, moviéndose por la cinta o siendo manipuladas.

Con esta alternativa, se elimina el cuello de botella que se producía a la entrada de la rectificadora en la situación inicial pero se genera otro a la entrada de la máquina de verificación. Sin embargo, se observa que el tiempo de espera es mucho menor, agilizándose la producción en esta nueva situación.

Tiempo total de producción

La alternativa propuesta a cerca de la disminución de los desperdicios respecto al tiempo de espera de las piezas durante la fabricación dentro de la célula, no afecta a las demás tareas que se llevan a cabo durante el proceso productivo total. En la tabla 5.6 se muestra el desglose de los tiempos que son necesarios para cada tarea.

| Tareas | Tiempo de ejecución | |
|--|---------------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | 1 hora | |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 minutos |
| | Útiles | 20 minutos |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | 40 minutos | |
| Proceso de fabricación en la célula | 4 horas 34 minutos | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | 20 minutos | |
| Devolución tochos no usados al almacén | 15 minutos | |
| Limpieza de la célula | 40 minutos | |
| Limpieza de las máquinas | 1 hora | |

Tabla 5. 6. Desglose del tiempo de producción por turno con duplicación de maquinaria. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

En esta alternativa, se siguen requiriendo dos turnos de trabajo diarios y tres operarios y un supervisor de planta para hacer frente a la producción de 40 piezas al día. En la tabla 5.7 se muestra la asignación de todas las tareas que se llevan a cabo durante un turno y la duración de las mismas.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|----------------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | - | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Colocación de tochos en la cinta | 3 h 6 min 45 s | - | - | 2 horas |
| | Limpieza de piezas | - | - | 3 h 48 min | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 20 min | - | - | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Limpieza de la célula | | - | 40 min | - | - |
| Limpieza de máquinas | | - | - | 1 hora | 40 min |

Tabla 5. 7. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores para el sistema de fabricación propuesto como alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Con la modificación del tiempo de fabricación de las piezas en el interior de la célula, la duración de las tareas de los operarios dentro de la misma también se ve alterada respecto a la situación inicial. Por ejemplo, de la tabla 5.7 se obtiene que el tiempo que el *operario 3* destina al proceso de limpieza se reduce en 1 hora y 35 minutos aproximadamente respecto a la situación inicial, donde hacían falta 5 horas y 23 minutos aproximadamente para realizar la misma tarea.

De la misma forma que se hizo en el capítulo anterior, se va a determinar el horario completo de cada trabajador para el primer turno de trabajo del día. El código de colores para representar las distintas tareas y descansos de cada trabajador es el mismo que se empleó en la descripción de los horarios de trabajo en el capítulo anterior.

Operario 1

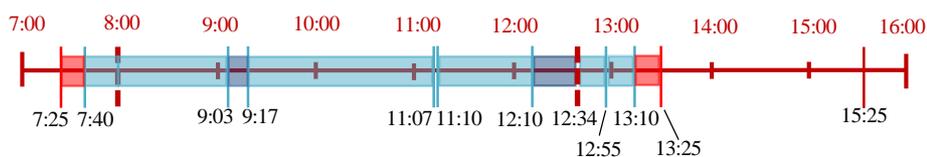


Figura 5. 3. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su turno a las 7:25 de la mañana y antes de iniciar sus tareas emplea 15 minutos en colocarse los equipos de protección individual necesarios. Tras equiparse con los EPIs, la primera tarea que realiza el operario es el aprovisionamiento de la célula con los tochos de material a las 7:40, para que a las 8:00 de comienzo la fabricación de las piezas. El *operario 1*, colocado entre el estante de tochos y el inicio de la cinta transportadora, va colocando los tochos correspondientes en los instantes de tiempo que se especificaron en las tablas 5.1 y 5.2. La introducción de los tochos en las células conlleva un tiempo de 3 horas y 7 minutos, por lo que esta tarea acaba a las 11:07. El primer descanso del operario se produce después de colocar el tocho correspondiente a la pieza B4 en la cinta y antes de introducir el tocho A4 y su duración es de algo menos de 15 minutos (desde las 9:03 hasta las 9:17).

Por otra parte, una vez cada dos meses se realiza la recepción de tochos, cuya duración es de 1 hora. Esta tarea se realiza siempre entre las 11:10 y las 12:10. En el horario habitual, por tanto, este tiempo se emplea para otro tipo de actividades que el operario tenga que realizar fuera del proceso de fabricación descrito, como la limpieza de las zonas de almacenamiento o el recuento y gestión del stock existente.

El proceso de fabricación en la célula tiene una duración de 4 horas y 34 minutos, por lo que finaliza a las 12:34. En dicho momento, el *operario 1* se dirige al estante de piezas terminadas y almacena las piezas fabricadas en su correspondiente almacén, tardando en ello 20 minutos. Tras esto, procede a la devolución de los tochos que no han sido utilizados al almacén de tochos. Esta tarea se realiza en 15 minutos, finalizándose a las 13:10. Después de esto, el operario emplea 15 minutos en quitarse y guardar los EPIs que ha estado utilizando. Su turno de trabajo concluye a las 15:25, por lo que desde las 13:10 hasta dicha hora, el *operario 1* realiza otro tipo de tareas relacionadas indirectamente con la fabricación.

El turno completo de trabajo es, por tanto, de 8 horas. El segundo turno del día para el *operario 1* es completamente similar al representado en la figura 5.3, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 16:25 y finaliza a las 00:25.

Operario 2

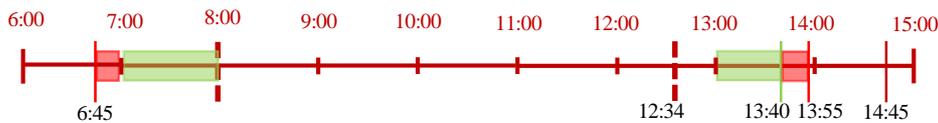


Figura 5. 4. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula trasladándolos desde el almacén hasta el estante intermedio de útiles de la célula. Al finalizar esta tarea, el operario procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Durante el proceso de fabricación el *operario 2*, al igual que en la situación inicial, permanece la mayor parte del tiempo fuera de la célula realizando otras tareas relacionadas con el mantenimiento de los equipos. Por esta razón dichas tareas no se incluyen en la figura 5.4.

La fabricación de las 20 piezas concluye a las 12:34, por lo que en dicho momento este operario se encarga de la limpieza general de la célula, tardando en ello 40 minutos. El tiempo necesario para quitarse y guardar los EPIs que emplea es de 15 minutos, finalizando a las 13:55. Como el turno de trabajo finaliza a las 14:45, el *operario 2* dispone de 50 minutos para realizar otras tareas fuera de la fabricación en la célula. Tras este turno de 8 horas, el siguiente comienza 15:45 y finaliza a las 23:45, con la misma duración de tareas y descansos.

Operario 3

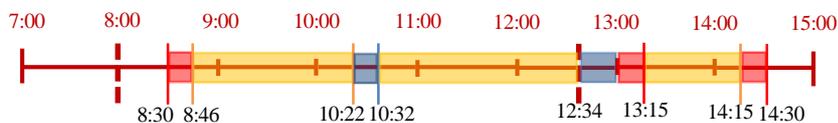


Figura 5. 5. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 3*, encargado del proceso de limpieza de las piezas y de la limpieza de todas las máquinas, comienza su turno a las 8:30 de la mañana, colocándose los EPIs oportunos para la manipulación de piezas manchadas de taladrina y de la solución de limpieza empleada en el proceso. Este operario comienza con la limpieza de piezas a 8:46 y finaliza a las 12:34.

Durante este tiempo el operario realiza un descanso de 10 minutos, desde las 10:22 hasta las 10:32. Éste se realiza después de recoger la pieza B6 de la cinta tras la verificación y tras colocarla en el estante de piezas verificadas y antes de recoger de la cinta la siguiente pieza, la pieza A5.

Habitualmente, el *operario 3* finaliza su trabajo en la célula a las 12:50, tras quitarse los EPIs empleados. Sin embargo, una vez a la semana, se realiza la limpieza completa de máquinas y equipos de trabajo en la que es

necesario retirar la cinta transportadora de material y el carril guía de los robots, para lo que se emplea una hora. En esta situación, tras acabar la limpieza de todas las piezas y colocarlas en el estante de piezas fabricadas, a las 12:34, el *operario 3* se toma un descanso hasta las 13:00. En ese momento, el operario se coloca los EPIs necesarios para llevar a cabo la limpieza de las máquinas y coge las herramientas y productos de limpieza que se precisan para llevar a cabo dicha tarea para iniciarla a las 13:15. Pasada una hora, el operario finaliza la tarea y concluye su turno de trabajo a las 14:30, tras quitarse y guardar los EPIs utilizados. Este turno de trabajo, que incluye la limpieza semanal de una hora de duración, sería de 6 horas.

El segundo turno del día para el *operario 3* es también similar al representado en la figura 5.5, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 17:30 y finaliza a las 21:50, cuando no se realiza la limpieza de las máquinas y a las 23:30 cuando sí se hace.

Supervisor

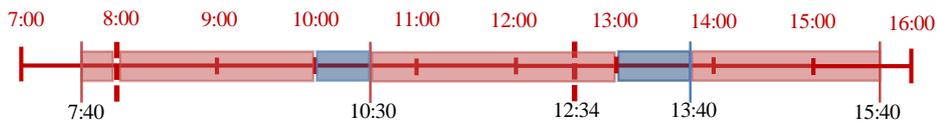


Figura 5. 6. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha comentado en varias ocasiones, el *supervisor* se encarga de controlar y comprobar el buen funcionamiento de cada tarea y operación dentro y fuera de la célula.

El turno completo de trabajo del supervisor es de 8 horas tal y como se muestra en la figura 5.6. Dicho turno cuenta con un descanso de 30 minutos, desde las 10:00 hasta las 10:30, y un descanso de 40 minutos, de 13:00 a 13:40. El segundo turno del día para el *supervisor* es similar al representado en dicha figura, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 16:40 y finalizando a las 00:40.

Diagrama de espagueti

Cada tarea realizada por los operarios conlleva unos desplazamientos por la planta de fabricación. Mediante el *diagrama de espagueti* representado en la figura 5.7 se pretende dar una visualización de todos los movimientos que se ejecutan en un turno de trabajo en el que que no se producen piezas con defectos.

En la tabla 5.8 se exponen todas las tareas de las cuales se representan los desplazamientos necesarios para llevarlas a cabo y el tipo y color de línea que los representa. De esta manera, los movimientos del *operario 1* se representan en color azul; los del *operario 2*, en verde y los del *operario 3*, en naranja.

La secuencia de todos estos movimientos es la descrita en la línea de tiempo de cada operario.

| Operario | Tarea | Tipo de línea |
|----------|---|---------------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ===== |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| | Limpieza de la célula | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Limpieza de las máquinas | ===== |

Tabla 5. 8. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.7. Fuente: Elaboración propia.

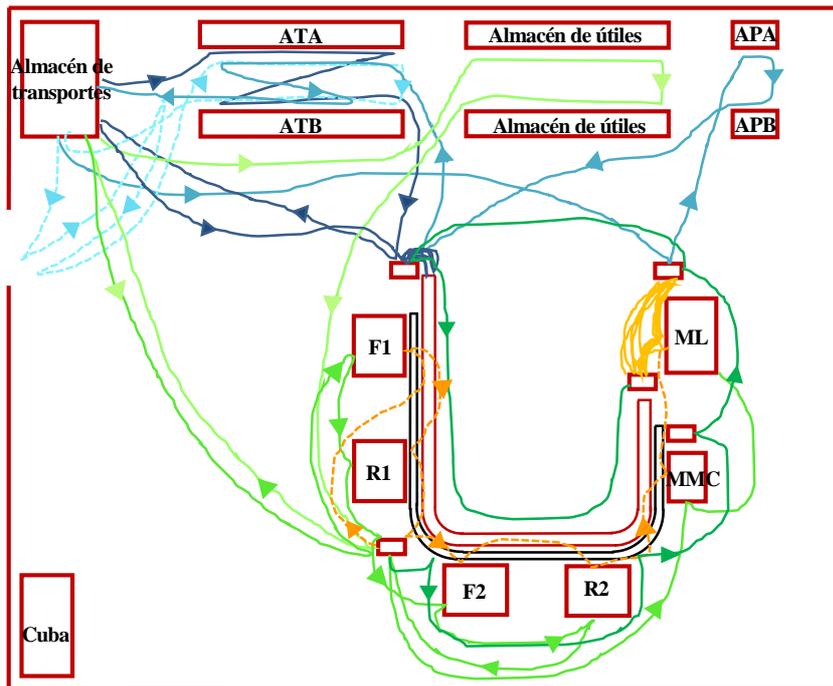


Figura 5. 7. Diagrama de espagueti de los movimientos de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 1. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3. Incidentes y tiempos asociados

En esta primera propuesta de mejora también ha de tenerse en cuenta la posibilidad de que puedan producirse una o varias piezas defectuosas durante las operaciones de mecanizado. Al igual que en la situación inicial de la célula descrita en el capítulo anterior se establece que en un turno de trabajo puedan producirse hasta un máximo de 4 piezas defectuosas. Este número da lugar a 14 combinaciones posibles de piezas que tengan que ser fabricadas de nuevo. A continuación se va a estimar el tiempo empleado en la nueva fabricación de dichas combinaciones, siguiendo el procedimiento de las tablas A.10 – A.18 del Anexo A, similar al de las tablas 5.1 y 5.2.

- Una pieza defectuosa de tipo A. Volver a producir una sola pieza de tipo A es similar a fabricar la pieza A1 (tabla 5.1) sin la espera a la entrada de la máquina de verificación y sin la espera para completar un lote de piezas para la limpieza, por lo que se tardan **4576 segundos** (1 h 16 min 16 s) en volver a fabricar una sola pieza de tipo A (tabla A.10).
- Una pieza defectuosa de tipo B. La nueva fabricación de una pieza de tipo B se lleva a cabo en **4275 segundos** (1 h 11 min 20 s), sin esperas de ningún tipo, al fabricarse una única pieza más (tabla A.12).
- Dos piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de dos piezas de tipo A conlleva un tiempo de **5821 segundos** (1 h 37 min 1 s), tal y como se muestra en la tabla A.10. Tras la verificación de la primera pieza se debe esperar hasta que finalice la verificación de la segunda para que ambas puedan ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza.
- Dos piezas defectuosas de tipo B. Al igual que en el caso anterior, la fabricación de piezas del mismo tipo, sólo conlleva esperas en el proceso de limpieza hasta que se completa un lote. El tiempo de fabricación de estas dos nuevas piezas es de **5220 segundos** (1 h 27 min).
- Una pieza defectuosa de tipo A y otra de tipo B. La fabricación de una pieza de cada tipo es similar al procedimiento de fabricación de las piezas A1 y B1 de las tablas 5.1 y 5.2. El tiempo empleado para ello es

- de **4920 segundos** (1 h 22 min), tal y como se expone en la tabla A.14.
- Tres piezas defectuosas de tipo A. Volver a fabricar tres piezas de tipo A supone un tiempo adicional de **7066** (1 h 57 min 46 s).
 - Tres piezas defectuosas de tipo B. Para fabricar tres piezas de tipo B se necesitan **6165 segundos** (1 h 42 min 45 s).
 - Dos piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. La secuencia de entrada a la célula de estas tres piezas es ABA. El nuevo procedimiento detallado en la tabla A.15 concluye que son necesarios **5821 segundos** (1 h 37 min 1 s) para su obtención.
 - Dos piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. La secuencia para las piezas en este caso es ABB y, según la tabla A.14, se necesitan también **5560 segundos** (1 h 32 min 40 s) para su fabricación.
 - Cuatro piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de cuatro piezas conlleva la agrupación de piezas en dos lotes de dos piezas cada uno para el proceso de limpieza (ya que como máximo pueden introducirse 3 piezas al mismo tiempo). La tabla A.11 indica que el tiempo de fabricación es de **8311 segundos** (2 h 18 min 31 s).
 - Cuatro piezas defectuosas de tipo B. Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso anterior, la tabla A.12 muestra un tiempo total de **7110 segundos** (1 h 58 min 30 s)
 - Dos piezas defectuosas de tipo A y dos de tipo B. La secuencia de entrada de estas tres piezas es ABBA y es similar a la producción de las piezas A1, B1, A2 y B2 mostradas en las tablas 5.1 y 5.2. El procedimiento detallado en la tabla A.16 expone que se necesitan **6200 segundos** (1 h 43 min 20 s) para su obtención.
 - Tres piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. Para estas piezas la secuencia es ABAA y supone un tiempo de **7066 segundos** (1 h 57 min 46 s).
 - Tres piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. Por último, si se requiere volver a fabricar estos tipos de piezas, la secuencia es AB BB, necesitando un total de **6200 segundos** (1 h 43 min 20 s).

Tal y como se muestra en la tabla 5.1, en la fabricación de las primeras 20 piezas de cualquier turno, la última pieza que sale de la máquina de medición de coordenadas es la pieza la A10. Tras su verificación, el *robot 3* la coloca en la cinta si ha superado dicho proceso o en el estante de piezas defectuosas en caso contrario. Hasta ese momento, habrán transcurrido 14890 segundos, 4 horas y 8 minutos aproximadamente, desde el inicio de la fabricación. Puesto que la fabricación comienza a las 8:00 de la mañana, en el caso del primer turno, se tiene que el proceso de verificación de la última pieza concluye a las 12:08. Teniendo en cuenta que el *operario 1* tarda 10 minutos en realizar el recuento de piezas defectuosas y en desplazarse de nuevo al inicio de la célula para colocar en la cinta los tochos correspondientes y que se pueda tomar un pequeño descanso antes de iniciar la nueva fabricación, se determina que la fabricación de las nuevas piezas comience a las 12:30. En el caso del segundo turno, comenzaría a las 21:30.

En la tabla 5.9 se recogen todos los tiempos de sobreprocesamiento anteriores, necesarios para la fabricación de las nuevas piezas, según la secuencia de piezas que se necesite fabricar, así como la hora de comienzo y final, aproximadamente, en cada caso.

| Secuencia de piezas | Tiempo de sobreprocesamiento | | Comienzo de la fabricación | Hora final de la fabricación |
|---------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| A | 4576 s | 1 h 16 min 16 s | 12:30 | 13:47 |
| B | 4275 s | 1 h 11 min 20 s | | 13:42 |
| AA | 5821 s | 1 h 37 min 1 s | | 14:07 |
| BB | 5220 s | 1 h 27 min | | 13:57 |
| AB | 4920 s | 1 h 22 min | | 13:52 |
| AAA | 7066 s | 1 h 57 min 46 s | | 14:28 |
| BBB | 6165 s | 1 h 42 min 45 s | | 14:13 |
| ABA | 5821 s | 1 h 37 min 1 s | | 14:07 |
| ABB | 5560 s | 1 h 32 min 40 s | | 14:03 |
| AAAA | 8311 s | 2 h 18 min 31 s | | 14:49 |
| BBBB | 7110 s | 1 h 58 min 30 s | | 14:29 |
| ABBA | 6200 s | 1 h 43 min 20 s | | 14:14 |
| ABAA | 7066 s | 1 h 57 min 46 s | | 14:28 |
| ABBB | 6200 s | 1 h 43 min 20 s | | 14:14 |

Tabla 5. 9. Resumen de tiempos de sobreprocesamiento y horas de comienzo y final de fabricación de las distintas secuencias de piezas en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

Con la aparición de incidencias durante la producción de las piezas en la célula, ya sean averías de máquinas, operaciones de sobreprocesamiento causadas por piezas defectuosas u otros problemas, los turnos de trabajo de los operarios se ven modificados respecto a las figuras 5.3-5.6.

En la tabla 5.10 se registra, para cada caso y secuencia de piezas, el tiempo de trabajo que los *operarios 1 y 3* deben emplear en la fabricación de las nuevas piezas dentro de la célula. Dependiendo del número y tipo de piezas a fabricar nuevamente, la duración de la permanencia de cada operario en su puesto de trabajo en el interior de la célula será mayor o menor. En la tabla se muestran coloreadas las filas correspondientes a los tiempos mínimos y máximos de dicha permanencia, tal y como se hizo en el capítulo anterior. Puede observarse que el tiempo máximo que los operarios permanecen en sus puestos de trabajo es el mismo que en la situación inicial de la célula: 1 hora y 3 minutos para el *operario 1* y 1 hora y 28 minutos para el *operario 3*.

| Secuencia de piezas | Tiempo de trabajo | | | |
|---------------------|-------------------|----------------|------------|-----------------|
| | Operario 1 | | Operario 3 | |
| A | - | - | 1520 s | 25 min 20 s |
| B | - | - | 1520 s | 25 min 20 s |
| AA | 1245 s | 20 min 45 s | 2765 s | 46 min 5 s |
| BB | 945 s | 15 min 45 s | 2465 s | 41 min 5 s |
| AB | 5 s | 5 s | 1520 s | 25 min 20 s |
| AAA | 2490 s | 41 min 30 s | 4010 s | 1 h 6 min 50 s |
| BBB | 1890 s | 31 min 30 s | 3410 s | 56 min 50 s |
| ABA | 1245 s | 20 min 45 s | 2421 s | 40 min 21 s |
| ABB | 950 s | 15 min 50 s | 2160 s | 36 min |
| AAAA | 3735 s | 1 h 2 min 15 s | 5255 s | 1 h 27 min 35 s |
| BBBB | 2835 s | 47 min 15 s | 4355 s | 1 h 12 min 35 s |
| ABBA | 1245 s | 20 min 45 s | 2800 s | 46 min 40 min |
| ABAA | 2490 s | 41 min 30 s | 3666 s | 1 h 1 min 6 s |
| ABBB | 1895 s | 31 min 35 s | 2800 s | 46 min 40 s |

Tabla 5. 10. Tiempos de trabajo de los operarios durante la fabricación de las nuevas piezas en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte y tal y como se hizo en el caso de la producción ideal o fabricación sin operaciones de sobreprocesamiento, en la tabla 5.11 se resumen todas las tareas, tanto si se realizan diariamente como si no (filas coloreadas), durante un turno de trabajo. En ella, se cuantifica la duración de cada tarea sin tener en cuenta los descansos de los operarios ni el tiempo empleado en ponerse los EPIs necesarios en las operaciones que lo requieran.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|----------------------------------|----------------|------------|-----------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | - | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | - |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Colocación de tochos en la cinta | 3 h 6 min 45 s | - | - | 2 horas |
| | Limpieza de piezas | - | - | 3 h 46 min | |
| Recuento de piezas defectuosas | | 10 min | - | - | - |
| Sobreproducción | Colocación de tochos en la cinta | 1 h 2 min 15 s | - | - | 1 hora |
| | Limpieza de piezas | - | - | 1 h 27 min 35 s | - |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | - | - | 20 min | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Almacenamiento de piezas defectuosas | | 15 min | - | - | - |
| Vaciado de la cuba de desechos | | - | - | - | 20 min |

Tabla 5. 11. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

La principal diferencia que se observa respecto a la producción ideal es la ausencia de las labores de limpieza, tanto de la célula como de las máquinas, tras la fabricación de las piezas. Al igual que en el caso de sobreprocesamiento en la célula de la situación inicial, el tiempo adicional que los empleados deben emplear en las operaciones de sobreprocesamiento hacen imposibles incluir dichas labores de limpieza dentro del mismo turno. Por lo tanto, en los turnos donde se produzcan piezas defectuosas y, por consiguiente, operaciones de sobreprocesamiento, no se realiza la limpieza de la célula ni de las máquinas tras la fabricación.

Otra gran diferencia respecto a la situación ideal de producción es la asignación de la tarea de almacenamiento de piezas terminadas. Cuando no se producen piezas defectuosas, esta tarea es realizada por el *operario 1*, mientras que en el caso contrario la realiza el *operario 3* tras concluir el proceso de limpieza de las nuevas piezas.

A partir de los datos recogidos en la tabla 5.11 se va a determinar el horario completo de cada trabajador durante el primer turno del día, incluyendo los descansos y la colocación de los equipos de protección necesarios, para el caso en que tengan que producirse cuatro piezas de tipo A. De esta forma se obtiene el turno de trabajo asociado a las tareas de mayor duración. El segundo turno es completamente similar.

Operario 1

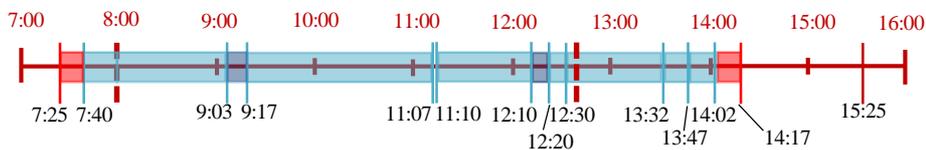


Figura 5. 8. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su turno a las 7:25 de la mañana colocándose los equipos de protección individual necesarios. Tras equiparse con los EPIs, y realizar el aprovisionamiento de la célula con los tochos, el operario comienza a introducirlos en la cinta a las 8:00 y acaba esta tarea a las 11:07. Al igual que en la situación sin sobreprocesamiento, el primer descanso se da entre las 9:03 y las 9:17. De igual forma, los días en lo que se recibe el pedido de los tochos se emplea una hora, desde las 11:10 hasta las 12:10, en gestionar dicho pedido y almacenar los tochos en su correspondiente almacén.

Tras la recepción, el *operario 1* se toma un descanso de 10 minutos, hasta las 12:20, instante en el que se dirige al estante de piezas defectuosas para realizar el recuento del número y el tipo de piezas que se deben volver a fabricar. La verificación de las 20 primeras piezas que se fabrican concluye a las 12:08, por lo que cuando el operario inicia el recuento, ya están todas las piezas no conformes colocadas en el estante correspondiente. Cabe puntualizar, que los días en los que no se realiza la recepción de tochos, el descanso previo al recuento de piezas defectuosas comienza a las 11:50. Una vez hecho el recuento, el operario se dirige al principio de la cinta transportadora de la célula, para iniciar la fabricación de las nuevas piezas, a las 12:30, con la colocación de los tochos correspondientes. Como máximo el operario permanecerá en dicho puesto hasta las 13:32, que es el tiempo que tarda en colocar los cuatro tochos de tipo A. En el caso de que la secuencia de piezas a fabricar sea otra cualquiera, el tiempo será menor.

Una vez colocados todos los tochos en la cinta, devuelve a su almacén los que no se hayan empleado, tardando en ello 15 minutos. Por último, la tarea final de este operario es el almacenamiento de las piezas defectuosas en la cuba de desechos. Esta última tarea finaliza a las 14:02, y tras 15 minutos aproximadamente que emplea en despojarse y guardar correctamente los EPIs usados, el *operario 1* finaliza su turno a las 15:25, por lo que desde las 14:17 hasta dicha hora, realiza otro tipo de tareas relacionadas indirectamente con la fabricación.

El turno completo de trabajo es, por tanto, de 8 horas. El segundo turno del día para el *operario 1* es completamente similar al representado en la figura 5.8, con la misma duración de tareas y descansos. Comienza a las 16:25 y finaliza a las 00:25.

Operario 2

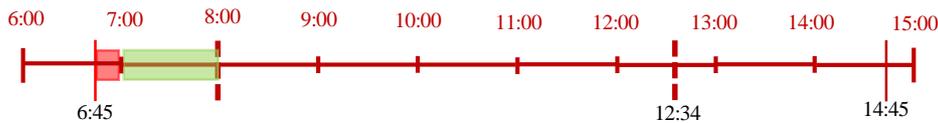


Figura 5. 9. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula trasladándolos desde el almacén hasta el estante intermedio de útiles de la célula. Al finalizar esta tarea, el operario procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Como en los casos anteriores, durante el proceso de fabricación el *operario 2* no permanece dentro de la célula mientras no se precisen labores de mantenimiento por roturas de equipos o averías y sus actividades no se detallan en la figura 5.9 debido a que no están directamente relacionadas con el trabajo dentro de la célula. Al no realizarse tampoco las labores de limpieza de la célula en los turnos donde se producen piezas defectuosas, este operario no tiene ninguna tarea asignada adicional a las ya comentadas. Su turno de trabajo es de 8 horas, el cual finaliza a las 14:45. Tras este turno de 8 horas, el siguiente turno comienza 15:45 y finaliza a las 23:45, con la misma duración de tareas y descansos.

Operario 3

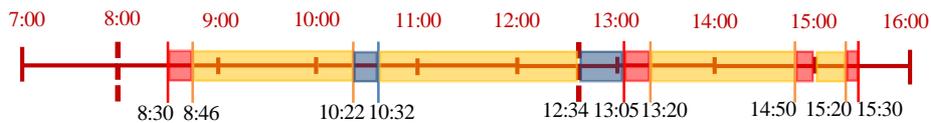


Figura 5. 10. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 3*, comienza su turno a las 8:30 de la mañana, colocándose los EPIs oportunos. A las 8:46 comienza con la limpieza de piezas y la finaliza a las 12:34. Durante este tiempo el operario realiza un descanso de 10 minutos, desde las 10:22 hasta las 10:32, al igual que en la situación ideal de fabricación.

Tras la limpieza de las piezas que hayan pasado satisfactoriamente el proceso de verificación, este operario se toma un descanso de 30 minutos, desde las 12:35 hasta las 13:05, momento tras el cual se coloca de nuevo los EPIs para comenzar con la limpieza de las nuevas piezas. Como máximo el operario permanece 1 hora y 28 minutos aproximadamente en el puesto de limpieza, en el caso de producir 4 piezas de tipo A. Cualquier otra secuencia de producción, esta tarea finalizará antes, concretamente a las horas indicadas en la quinta columna de la tabla 5.9. Tras concluir la limpieza de las piezas, el operario emplea 10 minutos en cambiarse los equipos de protección individuales para finalizar su turno de trabajo con el almacenamiento de las piezas fabricadas en su almacén, para lo que emplea 20 minutos.

El turno de trabajo de este operario finaliza a las 15:30, una vez haya guardado los EPIs empleados. El segundo turno comienza a las 17:30 y finaliza a las 00:30.

Supervisor

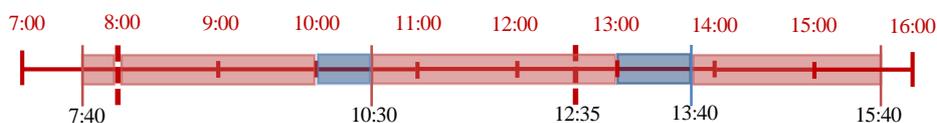


Figura 5. 11. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen piezas defectuosas en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo no sufre modificación respecto al descrito para la situación sin sobreprocesamiento, siendo éste de 8 horas tal y como se muestra en la figura 5.11. El supervisor cuenta con un descanso de 30 minutos, desde las 10:00 hasta las 10:30, y con un descanso de 40 minutos, de 13:00 a 13:40. El segundo turno del día para el *supervisor* es similar al representado en dicha figura, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 16:40 y finaliza a las 00:40.

Diagrama de espagueti

Los desplazamientos asociados a cada tarea realizada por los operarios durante un turno se muestran en el *diagrama de espagueti* de la figura 5.12. Asimismo en la tabla 5.12 se resumen todas las tareas y el tipo y color de línea que representan los movimientos de los operarios durante las mismas en el diagrama.

| Operario | Tarea | Tipo de línea |
|----------|---|---------------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ===== |
| | Almacenamiento de piezas defectuosas | ===== |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |

Tabla 5. 12. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.12.

Fuente: Elaboración propia.

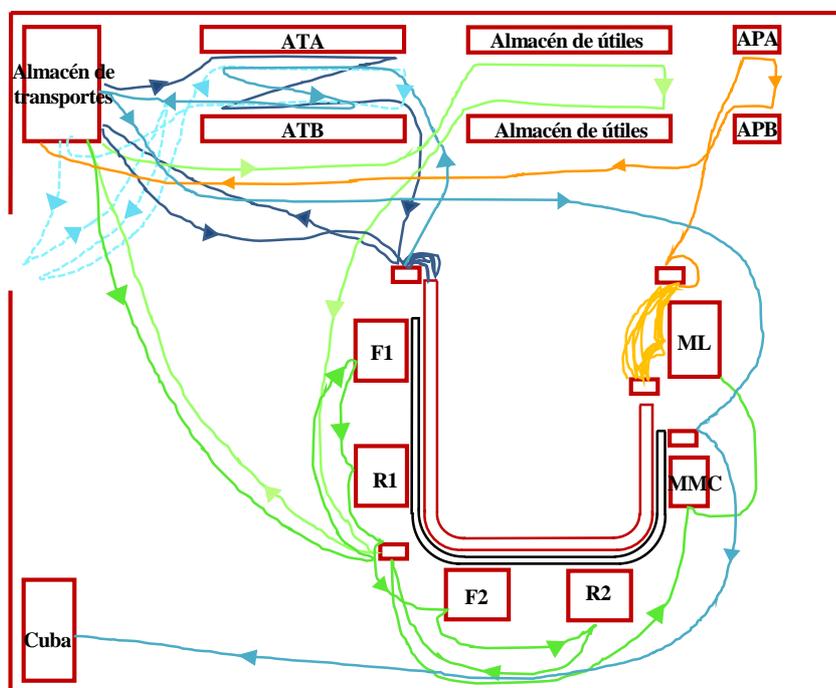


Figura 5. 12. Diagrama de espagueti de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 1, cuando se producen piezas defectuosas. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R1, rectificadora 1; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

aproximadamente. Son robots antropomórficos [subsección 2.5.1] apoyados sobre una plataforma giratoria que le permite rotar 360° sobre sí mismos y tienen un alcance de hasta 2.5 metros de distancia, por lo que ninguna máquina o estante debe situarse más allá de esta distancia del robot correspondiente.

La ausencia de una cinta transportadora que dirija las piezas de una máquina a otra hace imprescindible la utilización de más estantes, que los indicados en la situación inicial de la célula de fabricación. Todos ellos tienen las mismas dimensiones y características que se especificaron en el capítulo anterior [subsección 4.2.4].

El espacio ocupado por esta nueva célula es de 11 x 9.5 m², respecto a los 11.5 x 14 m² de la célula de la situación inicial. Los 11 metros corresponden a la distancia entre las partes exteriores de las fresadoras y el estante de piezas terminadas, PT. Los 9.5 metros, a la distancia entre las caras exteriores de la máquina de limpieza y la rectificadora. Esto conlleva una reducción del espacio ocupado de esta célula dentro de la planta de fabricación.

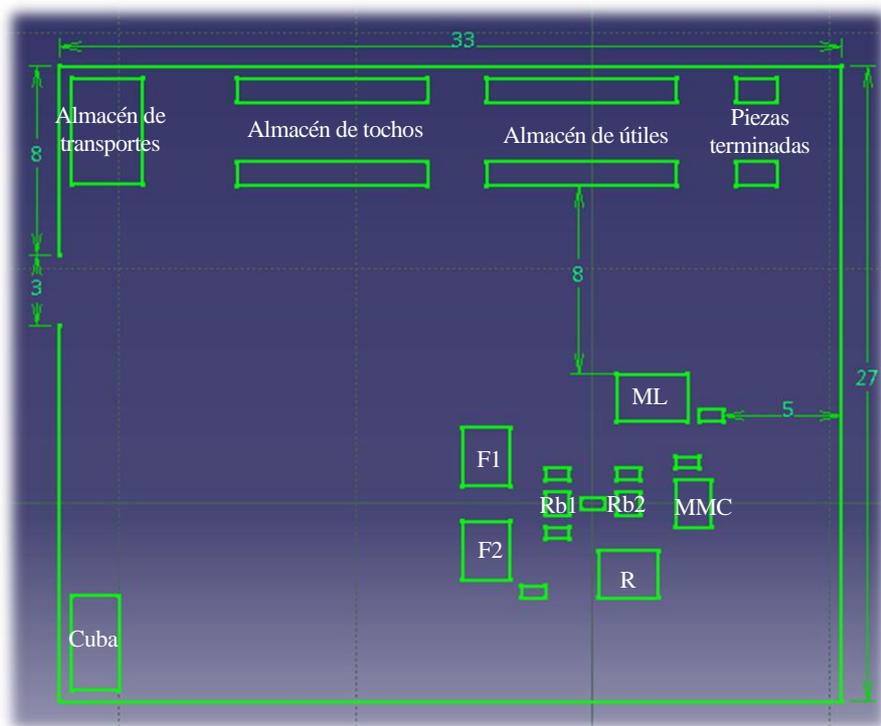


Figura 5. 14. Situación de la célula centrada en robots en la planta de fabricación.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.14 se muestra la situación de la célula respecto a la planta de fabricación. La distancia de dicha célula a los almacenes es de 8 metros, mientras que distan 5 metros de la pared derecha de la planta. De la pared inferior la separan aproximadamente 4.5 metros y de la pared izquierda 17 metros.

5.1.2.1. Tiempos de fabricación

Al igual que ocurre con la primera solución propuesta, la fabricación dentro de la célula es la única etapa del proceso de fabricación total que se modifica, por lo que la recepción y almacenamiento de tochos y piezas, el aprovisionamiento de la célula, la puesta a punto de las máquinas y la limpieza de la célula no se ven modificados, empleando el mismo tiempo que se especificó en la situación inicial.

En esta nueva disposición de la célula, al no contar con una cinta que transporte las piezas entre las máquinas, el proceso de fabricación es algo diferente respecto al de la situación inicial y al de la primera alternativa. A continuación se va a describir el nuevo proceso dentro de la célula.

Una vez colocados los tochos de ambos tipos de piezas en los estantes TA y TB, el *robot 1* se encarga de alimentar las fresadoras con dichos tochos. Las piezas fresadas son colocadas por el mismo robot en el estante PF. Dicho estante se ubica a la misma distancia del *robot 1* que del *robot 2*, ya que es este último quien toma las piezas fresadas del estante y las va introduciendo en la rectificadora por orden de llegada. Tras el rectificado, el *robot 2* coloca las piezas en el estante PR hasta que llegue el momento de introducirlas en la máquina de medición de coordenadas. Si el proceso de verificación es satisfactorio, el *robot 2* coloca las piezas en el estante PL, donde las piezas esperan hasta que se forme un lote de 3 piezas para ser introducidas por un operario en la máquina de limpieza. Por el contrario, si se encuentra algún defecto en las piezas, el *robot 2* las coloca en el estante de piezas defectuosas, PD. Finalmente las piezas que salen de la máquina de limpieza se colocan en el estante de piezas terminadas, hasta que un operario las transporta hasta su almacén.

El proceso de fabricación y los tiempos empleados en cada operación se detallan en las tablas 5.13 y 5.14, de una forma similar a lo realizado para la situación inicial y para la primera alternativa. La secuencia de entrada sigue siendo la misma, alternando piezas de distinto tipo, desde la pieza A1 hasta la pieza B10; sin embargo, la forma y los tiempos de manipulación de material son muy diferentes. Para el estudio de los tiempos de cada tarea y operación se han fijado dos cantidades de tiempo que los robots emplean en su movimiento de una máquina a otra y en la manipulación de las piezas. De este modo se acuerda que el tiempo que cada robot emplea en trasladar una pieza desde una máquina o estante a otro es de 20 segundos, mientras que si el movimiento del robot no incluye el transporte y colocación de piezas, éste se realiza en 10 segundos.

Antes de iniciar la fabricación un operario coloca los tochos de aluminio en los estantes junto a las fresadoras. En ese momento, el operario se retira y no vuelve a intervenir en el proceso hasta finalizar la fabricación. La fabricación se inicia cuando el *robot 1* se desplaza hasta el estante de tochos de tipo A y tras coger el primero, lo deposita en la *fresadora 1*. Todos los tochos posteriores al primero, de ambos tipos, asumen un tiempo de espera hasta ser recogidos por dicho robot, como se indica en la primera fila de datos de las tablas 5.13 y 5.14.

Una vez colocado el tocho A1 en la *fresadora 1*, dicho robot se dirige hacia el estante de tochos de tipo B, tardando en ello 10 segundos, para coger el primero de ese tipo e introducirlo en la *fresadora 2*. Tras 15 minutos de fresado, el robot recoge la pieza B1 de la *fresadora 2* y en el segundo 970 la coloca en el estante destinado al almacenamiento de piezas fresadas antes de la rectificadora.

Tras colocar la pieza B1 en el estante, el *robot 1* se dirige de nuevo al estante de tochos de tipo B, al que llega en el segundo 980, y toma un segundo tocho que tras 20 segundos es posicionado dentro de la *fresadora 2*. Al mismo tiempo que ocurre esto, el *robot 2* toma la pieza B1 del estante de piezas fresadas y la introduce en la rectificadora y al finalizar el proceso en esta, en la máquina de medición de coordenadas.

Una vez finalizado el proceso de fresado de la pieza A1 el *robot 1* la coloca en el estante de piezas fresadas y seguidamente se mueve hasta el estante de tochos de tipo A para colocar el segundo tocho de este tipo en la *fresadora 1*. El *robot 1*, por tanto, se encarga de desplazar y colocar los tochos de los estantes correspondientes en las fresadoras y una vez terminado dicho proceso colocar las piezas en el estante de piezas fresadas. De esta manera, tras el fresado de cada pieza de tipo B, el robot deja la pieza fresada en el estante PF y se dirige hacia el estante de tochos de tipo B para introducir otro en la *fresadora 2*, tardando en dicho movimiento 10 segundos. Y de la misma forma, tras el fresado de cada pieza de tipo A, el robot deja la pieza fresada en el estante PF y se dirige hacia el estante de tochos de tipo A para introducir otro en la *fresadora 1*. A partir de este momento de la fabricación, todas las piezas son manipuladas por el *robot 2*.

El *robot 2* se encarga de posicionar y desplazar las piezas durante las operaciones de rectificado y verificación. Siguiendo con el proceso de fabricación de la pieza B1, una vez acabado su rectificado, el *robot 2* coloca la pieza en la máquina de verificación (en el segundo 1910). Seguidamente se dirige al estante de piezas fresadas, tardando en ello 10 segundos, donde recoge la primera pieza que se colocó, A1, y la introduce en la rectificadora en el segundo 1940, tardando 20 segundos en el movimiento. Cuando finaliza la verificación de B1, en el segundo 2510, ésta es colocada en el estante junto a la máquina de limpieza y cuando acaba el rectificado de la pieza A1, en el segundo 2840, dicha pieza se coloca en la máquina de medición de coordenadas. Justo después, el *robot 2* se dirige hacia el estante de piezas fresadas y toma la siguiente pieza, B2, para introducirla en la rectificadora. De esta forma cada vez que el robot introduce una pieza en la máquina de verificación, seguidamente se dirige al estante de piezas fresadas para colocar la siguiente pieza en la rectificadora. De esta manera se van completando todas las casillas de las tablas.

| Movimiento/proceso | Tiempos | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|---------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 1250 | 2500 | 3750 | 5000 | 6250 | 7500 | 8750 | 10000 | 11250 |
| Estante TA-fresadora 1 | 20 s | 0/20 | 1250/1270 | 2500/2520 | 3750/3770 | 5000/5020 | 6250/6270 | 7500/7520 | 8750/8770 | 10000/10020 | 11250/11270 |
| Fresado | 20 min | 20/1220 | 1270/2470 | 2520/3720 | 3770/4970 | 5020/6220 | 6270/7470 | 7520/8720 | 8770/9970 | 10020/11220 | 11270/12470 |
| Fresadora 1- estante PF | 20 s | 1220/1240 | 2470/2490 | 3720/3740 | 4970/4990 | 6220/6240 | 7470/7490 | 8720/8740 | 9970/9990 | 11220/11240 | 12470/12490 |
| Espera en estante PF | - | 1240/1920 | 2490/3820 | 3740/5720 | 4990/8570 | 6240/10470 | 7490/12370 | 8740/15220 | 9990/17120 | 11240/18070 | 12490/19020 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 3820/3840 | 5720/5740 | 8570/8590 | 10470/10490 | 12370/12390 | 15220/15240 | 17120/17140 | 18070/18090 | 19020/19040 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 3840/4740 | 5740/6640 | 8590/9490 | 10490/11390 | 12390/13290 | 15240/16140 | 17140/18040 | 18090/18990 | 19040/19940 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 4740/4760 | 6640/6660 | 9490/9510 | 11390/11410 | 13290/13310 | 16140/16160 | 18040/18060 | 18990/19010 | 19940/19960 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 4760/5360 | 6660/7260 | 9510/10110 | 11410/12010 | 13310/13910 | 16160/16760 | 18060/18660 | 19010/19610 | 19960/20560 |
| MMC-estante PL/PD | 20 s | 3460/3480 | 5360/5380 | 7260/7280 | 10110/10130 | 12010/12030 | 13910/13930 | 16760/16780 | 18660/18680 | 19610/19630 | 20560/20580 |
| Espera lote | - | 3480/4430 | 5380/7280 | - | - | 12030/12980 | 13930/15830 | 16780/18680 | - | 19630/20580 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 4430/4450 | 7280/7300 | 7280/7300 | 10130/10150 | 12980/13000 | 15830/15850 | 18680/18700 | 18680/18700 | 20580/20600 | 20580/20600 |
| Limpieza | 20 min | 4450/5650 | 7300/8500 | 7300/8500 | 10150/11350 | 13000/14200 | 15850/17050 | 18700/19900 | 18700/19900 | 20600/21800 | 20600/21800 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 5650/5950 | 8500/8800 | 8500/8800 | 11350/11650 | 14200/14500 | 17050/17350 | 19900/20200 | 19900/20200 | 21800/22100 | 21800/22100 |

Tabla 5. 13. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo A en la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Tiempos | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 |
|---------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| Espera-robot 1 | - | 30 | 980 | 1930 | 2880 | 3830 | 4780 | 5730 | 6680 | 7630 | 8580 |
| Estante TB-fresadora 2 | 20 s | 30/50 | 980/1000 | 1930/1950 | 2880/2900 | 3830/3850 | 4780/4800 | 5730/5750 | 6680/6700 | 7630/7650 | 8580/8600 |
| Fresado | 15 min | 50/950 | 1000/1900 | 1950/2850 | 2900/3800 | 3850/4750 | 4800/5700 | 5750/6650 | 6700/7600 | 7650/8550 | 8600/9500 |
| Fresadora 2-estante PF | 20 s | 950/970 | 1900/1920 | 2850/2870 | 3800/3820 | 4750/4770 | 5700/5720 | 6650/6670 | 7600/7620 | 8550/8570 | 9500/9520 |
| Espera en estante PF | - | - | 1920/2870 | 2870/4770 | 3820/6670 | 4770/7620 | 5720/9520 | 6670/11420 | 7620/13320 | 8570/14270 | 9520/16170 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 970/990 | 2870/2890 | 4770/4790 | 6670/6690 | 7620/7640 | 9520/9540 | 11420/11440 | 13320/13340 | 14270/14290 | 16170/16190 |
| Rectificado | 15 min | 990/1890 | 2890/3790 | 4790/5690 | 6690/7590 | 7640/8540 | 9540/10440 | 11440/12340 | 13340/14240 | 14290/15190 | 16190/17090 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 1890/1910 | 3790/3810 | 5690/5710 | 7590/7610 | 8540/8560 | 10440/10460 | 12340/12360 | 14240/14260 | 15190/15210 | 17090/17110 |
| Verificación | 10 min | 1910/2510 | 3810/4410 | 5710/6310 | 7610/8210 | 8560/9160 | 10460/11060 | 12360/12960 | 14260/14860 | 15210/15810 | 17110/17710 |
| MMC-estante PL/PD | 20 s | 2510/2530 | 4410/4430 | 6310/6330 | 8210/8230 | 9160/9180 | 11060/11080 | 12960/12980 | 14860/14880 | 15810/15830 | 17710/17730 |
| Espera lote | - | 2530/4430 | - | 6330/7280 | 8230/10130 | 9180/10130 | 11080/12980 | - | 14880/15830 | - | 17730/18680 |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 4430/4450 | 4430/4450 | 7280/7300 | 10130/10150 | 10130/10150 | 12980/13000 | 12980/13000 | 15830/15850 | 15830/15850 | 18680/18700 |
| Limpieza | 20 min | 4450/5650 | 4450/5650 | 7300/8500 | 10150/11350 | 10150/11350 | 13000/14200 | 13000/14200 | 15850/17050 | 15850/17050 | 18700/19900 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 5650/5950 | 5650/5950 | 8500/8800 | 11350/11650 | 11350/11650 | 14200/14500 | 14200/14500 | 17050/17350 | 17050/17350 | 19900/20200 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | 22100 s = 6 h 8 min 20 s |

Tabla 5. 14. Tiempos de fabricación de las piezas de tipo B en la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminado el proceso de verificación, las piezas que cumplan con los requisitos de diseño y calidad son colocadas por el *robot 2* en un estante junto a la máquina de limpieza. Al igual que en los casos anteriores, la limpieza se lleva a cabo de forma manual en lotes de 3 piezas, por lo que las piezas 1 y 2 de cada lote deben esperar 1900 y 950 segundos, respectivamente, hasta que la tercera pieza del lote llegue al estante PL. Cuando el lote se completa, el operario transporta las piezas hasta la máquina, las introduce junto a la solución de limpieza y acciona el botón de la máquina para que comience el proceso, tardando en ello 20 segundos. Pasados 20 minutos, el operario tarda 5 minutos en extraer las piezas de la máquina de limpieza y en colocarlas, una vez secas, en el último estante situado también junto a la máquina.

Conclusiones

- La secuencia de salida de las piezas de la máquina de rectificación y, por tanto, el orden de entrada en la máquina de limpieza es: B1, A1, B2, A2, B3, A3, B4, B5, A4, B6, A5, B7, A6, B8, B9, A7, B10, A8, A9, A10; la misma que la obtenida en la alternativa 1.
- En la siguiente tabla se muestra cada cuanto tiempo sale una pieza procesada de cada máquina.

| | Fresadora 1 | Fresadora 2 | Rectificadora | Máquina de verificación | Máquina de limpieza |
|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tiempo | 1250 s (20 min 50 s) | 950 s (15 min 50 s) | 950 s (15 min 50 s) | 950 s (15 min 50 s) | 2850 s (47 min 30 s) |

Tabla 5. 15. Periodicidad de procesado de las piezas en cada máquina en la célula de la alternativa 2.

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, cada 21 minutos aproximadamente sale una pieza fresada de la *fresadora 1* y cada 16 minutos, de la *fresadora 2*. De la rectificadora y de la máquina de verificación sale una pieza cada 16 minutos aproximadamente y de la máquina de limpieza sale un lote cada 48 minutos. En total se introducen 6 lotes de 3 piezas y un lote de 2 piezas en la máquina de limpieza y las piezas que los forman son: B1-A1-B2, A2-B3-A3, B4-B5-A4, B6-A5-B7, A6-B8-B9, A7-B10-A8, A9-A10.

- El tiempo total de fabricación es de **22100 segundos** o, en otras palabras, **6 horas y 9 minutos**, aproximadamente. Teniendo en cuenta que el tiempo de fabricación total en la célula de la situación inicial era de 22154 segundos, puede apreciarse que con la nueva configuración se han reducido únicamente 54 segundos, por lo que a priori no parece ser la solución más idónea.

Esperas

Para continuar con el estudio de esta segunda alternativa se debe establecer el tiempo de espera y los tiempos no productivos para cada pieza y comprobar si esta solución reduce los desperdicios asociados a dichos tiempos. En la tabla 5.16 se muestran dichos tiempos. En este caso, el tiempo no productivo se asocia únicamente al tiempo de manipulación de las piezas entre máquinas y estantes mediante robots o el operario de limpieza, mientras que el tiempo de espera se produce en el estante de tochos, a la entrada de la rectificadora y a la entrada de la máquina de limpieza.

En la primera columna se anotan por orden de entrada en la célula los tochos de material y en la segunda, el tiempo que cada pieza permanece a la espera de ser recogida por el *robot 1* antes de introducirla en la fresadora correspondiente. Tras 11250 segundos (3 horas, 7 minutos y 30 segundos) no queda ningún tocho en los estantes junto a las fresadoras.

Tras el proceso de fresado, las piezas mecanizadas de ambos tipos son colocadas en un estante a la espera de que el *robot 2* las coloque dentro de la rectificadora. En la tercera columna se anota este tiempo y el máximo se da para la pieza A8 con 7130 segundos (1 hora 58 minutos, 50 segundos) de espera.

En la cuarta columna se refleja el tiempo que cada pieza espera hasta completar un lote de tres piezas para ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza. La primera pieza de cada lote espera un total de 1900 segundos (31 minutos 40 segundos) y la segunda, 950 segundos (15 minutos, 50 segundos). En el último lote compuesto por las dos últimas piezas, A9 y A10, la primera pieza en llegar espera 950 segundos. En la quinta columna se registra el tiempo empleado en el movimiento de las piezas. De esta forma, se calcula que todas las piezas pasan un total de 420 segundos (7 minutos) en operaciones de manipulación.

| Piezas | Espera en estante de tochos | Entrada en la rectificadora | Lote limpieza | Manipulación robot/operario | Total por pieza |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------|
| A1 | 0 | 680 | 950 | 420 | 2050 |
| B1 | 30 | 0 | 1900 | | 2350 |
| A2 | 1250 | 1330 | 1900 | | 4780 |
| B2 | 980 | 950 | 0 | | 2350 |
| A3 | 2500 | 1980 | 0 | | 4900 |
| B3 | 1930 | 1900 | 950 | | 5200 |
| A4 | 3750 | 3580 | 0 | | 7750 |
| B4 | 2880 | 2850 | 1900 | | 8050 |
| A5 | 5000 | 4230 | 950 | | 10600 |
| B5 | 3830 | 2850 | 950 | | 8050 |
| A6 | 6250 | 4880 | 1900 | | 13450 |
| B6 | 4780 | 3800 | 1900 | | 10900 |
| A7 | 7500 | 6480 | 1900 | | 16300 |
| B7 | 5730 | 4750 | 0 | | 10900 |
| A8 | 8750 | 7130 | 0 | | 16300 |
| B8 | 6680 | 5700 | 950 | | 13750 |
| A9 | 10000 | 6830 | 950 | | 18200 |
| B9 | 7630 | 5700 | 0 | | 13750 |
| A10 | 11250 | 6530 | 0 | | 18200 |
| B10 | 8580 | 6650 | 950 | | 16600 |

Tabla 5. 16. Tiempos (en segundos) no productivos y esperas durante la fabricación en la alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

El total de tiempo que sobre las piezas no se está realizando ninguna operación se anota en la última columna, siendo el máximo 18200 segundos (5 horas, 3 minutos y 20 segundos) para las piezas A9 y A10.

En la tabla 5.17 se refleja además el porcentaje que suponen estos tiempos no productivos respecto al tiempo total que permanece la pieza en el interior de la célula (desde que son tomadas por el robot 1 de los estantes de tochos hasta que termina el proceso de limpieza y se sitúan en el estante PT junto a esta máquina).

| Piezas | Tiempo total en la célula (robot-fin de limpieza) | Esperas y tiempo no productivo | Esperas y tiempo no productivo (%) |
|--------------|---|--------------------------------|------------------------------------|
| A1 | 5950 | 2050 | 34 |
| B1 | 5920 | 2320 | 39 |
| A2 | 7550 | 3530 | 47 |
| B2 | 4970 | 1370 | 27 |
| A3 | 6300 | 2400 | 38 |
| B3 | 6870 | 3270 | 48 |
| A4 | 7900 | 4000 | 50 |
| B4 | 8770 | 5170 | 59 |
| A5 | 9500 | 5600 | 59 |
| B5 | 7820 | 4220 | 54 |
| A6 | 11100 | 7200 | 65 |
| B6 | 9720 | 6120 | 63 |
| A7 | 12700 | 8800 | 69 |
| B7 | 8770 | 5170 | 59 |
| A8 | 11450 | 7550 | 66 |
| B8 | 10670 | 7070 | 66 |
| A9 | 12100 | 8200 | 68 |
| B9 | 9720 | 6120 | 63 |
| A10 | 10850 | 6950 | 64 |
| B10 | 11620 | 8020 | 69 |
| Media | 9013 | 5257 | 55.4 |

Tabla 5. 17. Comparativa del tiempo (en segundos) que cada pieza permanece en la célula de la alternativa 2 durante la fabricación y las esperas durante la misma. Fuente: Elaboración propia.

El tiempo medio que una pieza permanece en la célula es de 9013 segundos (2 horas 30 minutos 13 segundos). Este tiempo varía de una pieza a otra debido principalmente al cuello de botella a la entrada de la rectificadora.

El tiempo medio de espera y manipulación de las piezas es de 5257 segundos (1 hora 27 minutos y 37 segundos). Esto supone que del tiempo total en el que las piezas están dentro de la célula, en torno al 55.4 % de media están paradas o siendo manipuladas.

Tiempo total de producción

En esta segunda alternativa sólo se modifica la duración de las tareas de limpieza de la célula y de las máquinas, por la razón que se expone en el siguiente apartado. En la tabla 5.18 se recuerda el desglose de los tiempos que son necesarios para las demás tareas.

| Tareas | | Tiempo de ejecución |
|--|--------|---------------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 40 minutos |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 minutos |
| | Útiles | 15 minutos |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | 30 minutos |
| Proceso de fabricación en la célula | | 6 h 8 min 20 s |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 20 minutos |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 minutos |
| Limpieza de la célula y máquinas | | 50 minutos |

Tabla 5. 18 Desglose del tiempo de producción por turno en la célula de la alternativa 2.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

De igual forma que en la situación inicial, en la célula centrada en robots se requiere el trabajo de tres operarios y un supervisor que gestione y controle el proceso productivo. Sin embargo, el número total de tareas y la asignación de cada una de ellas a los distintos empleados se ven modificados respecto a la situación inicial.

La primera variación es la ausencia del *operario 1* en el interior de la célula para realizar la colocación de tochos en la cinta transportadora de la situación inicial. En esta alternativa, que no precisa de una cinta que transporte los tochos y piezas por la célula, son los robots quienes desplazan, transportan y colocan los materiales en las máquinas y estantes intermedios. Por tanto, el *operario 1* se limita a colocar los tochos en los estantes TA y TB, dejando al *robot 1* la alimentación de material en las fresadoras.

La segunda modificación de las tareas se hace respecto a la limpieza de la célula y de las máquinas. En este layout centrado en robots se dispone de espacio suficiente que permita el paso de operarios para realizar dichas tareas sin necesidad de retirar los equipos de trabajo, tal y como sucedía en la situación inicial. Por esta razón, las tareas de limpieza tanto de la célula como de las máquinas se realizan diariamente y tienen una duración de 50 minutos.

En la tabla 5.19 se muestra la asignación de las tareas a los trabajadores y el tiempo necesario para cada una de ellas. Puede observarse que fuera de las modificaciones comentadas anteriormente, las tareas restantes tienen la misma duración, exceptuando la limpieza de las piezas durante el proceso de fabricación, y están asignados a los mismos trabajadores que en la célula de la situación inicial.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|--------------------|------------|------------|-----------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | - | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Limpieza de piezas | - | - | 4 h 54 min 30 s | 2 horas |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 20 min | - | - | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Limpieza de la célula y máquinas | | - | 50 min | - | 40 min |

Tabla 5. 19. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores para el sistema de fabricación propuesto como alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos mostrados en la tabla 5.19 puede determinarse el horario de trabajo de cada empleado para el primer turno del día, ya que el segundo es completamente similar. El código de colores para representar las distintas tareas y descansos de cada trabajador es el mismo que se empleó en la descripción de los horarios de trabajo en el capítulo anterior.

Operario 1



Figura 5. 15. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su jornada laboral a las 7:25 de la mañana. Antes de comenzar con sus tareas emplea 15 minutos en colocarse los EPIs oportunos para la manipulación de tochos y piezas. Tras esto, el operario comienza a las 7:40 el aprovisionamiento de la célula con los tochos de material, para que a las 8:00 de comienzo la fabricación de las piezas dentro de la célula. En esta tarea el operario transporta 28 tochos, 14 de cada tipo, desde el almacén de tochos hasta los estantes TA y TB situados junto al *robot 1*. Una vez terminada esta tarea, el operario se retira de la célula y no vuelve a intervenir hasta que finalice el proceso de fabricación, a las 14:09. Seguidamente, de 8:00 a 9:00 se realiza la recepción y almacenamiento de los tochos comprados los días destinados para ello, una vez cada dos meses.

Al finalizar la fabricación de las 20 piezas, a las 14:09, el operario se dirige al estante de piezas terminadas para colocarlas en su almacén y al estante de tochos, para devolver los que no hayan sido utilizados de nuevo al almacén de tochos. Ambas tareas las realiza en 35 minutos. Finalmente, el operario emplea otros 15 minutos en quitarse y guardar los EPIs que ha estado utilizando, antes de abandonar su puesto de trabajo a las 15:00.

Puede observarse en la figura 5.15 que, desde las 8:00, habitualmente, o desde las 9:00, los días en los que se reciben los tochos, hasta la finalización de la fabricación de las piezas a las 14:10, el *operario 1* no tiene asignada ninguna tarea asociada al proceso productivo. Sin embargo, durante todo ese tiempo el operario se ocupa de otras tareas necesarias aunque no imprescindibles para la fabricación de las piezas, como por ejemplo, la limpieza de las áreas de paso en la planta y la gestión de stock en los almacenes, entre otras. El segundo turno del día, similar al representado en la figura 5.15. Comienza a las 16:25 y finaliza a las 00:00.

Operario 2

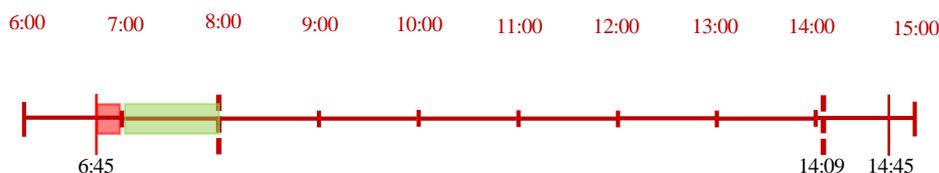


Figura 5. 16. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula trasladándolos desde el almacén hasta el estante intermedio de útiles de la célula. Al finalizar esta tarea, el operario procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Durante el proceso de fabricación, como en las anteriores situaciones, el *operario 2* no permanece dentro de la célula mientras no se precisen labores de mantenimiento por roturas de equipos o averías. El turno de trabajo del *operario 2* es de 8 horas, por lo que finaliza su jornada a las 14:45. El segundo turno comienza a las 15:45 y finaliza a las 23:45.

Operario 3

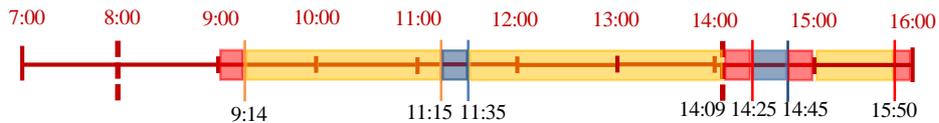


Figura 5. 17. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El operario 3, comienza su turno diario a las 9:00 de la mañana, colocándose los EPIs oportunos para la manipulación de piezas manchadas de taladrina y de la solución de limpieza empleada en el proceso. Su primera tarea es la limpieza de piezas tras la verificación de las mismas, que comienza a las 9:14 y finaliza a las 14:09. Durante todo este tiempo el operario 3 dispone de un descanso de 20 minutos, entre las 11:15 y las 11:35. Este descanso tiene lugar mientras la producción de piezas sigue su curso, justo cuando el operario coloca el tercer lote de piezas limpias en el estante PT y antes de que tenga que introducir el siguiente lote en la máquina de limpieza.

Tras colocar el último lote de piezas en el estante PT, y emplear 15 minutos es despojarse de los EPIs utilizados en la tarea, el operario se toma un descanso de unos 20 minutos para luego continuar con una limpieza general de la célula y las máquinas. Para ello, tras el descanso, el operario se coloca otros equipos de protección individuales limpios, que deberá guardar una vez haya concluido la tarea para la que sirven.

El operario 3 finaliza su turno de trabajo a las 16:00. El segundo turno del día es también similar al representado en la figura 5.17. Comienza a las 18:00 y finaliza a las 01:00.

Supervisor

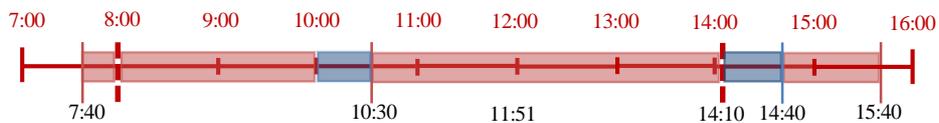


Figura 5. 18. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El supervisor no modifica su turno de trabajo respecto al indicado en la situación inicial de la célula. Su turno de trabajo es de 8 horas tal y como se muestra en la figura 5.18. Dicho turno cuenta con dos descansos de 30 minutos: uno, desde las 10:00 hasta las 10:30, y el otro, de 14:10 a 14:40. El segundo turno del día para el supervisor es similar al representado en la figura 5.18, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 16:40 y finaliza a las 00:40.

Diagrama de espagueti

Los movimientos de los operarios asociados a las tareas, que se recogen en la tabla 5.20, se muestran en la figura 5.19.

| Operario | Tarea | |
|----------|---|-------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ===== |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| | Limpieza de la célula y máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |

Tabla 5. 20. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.19. Fuente: Elaboración propia.

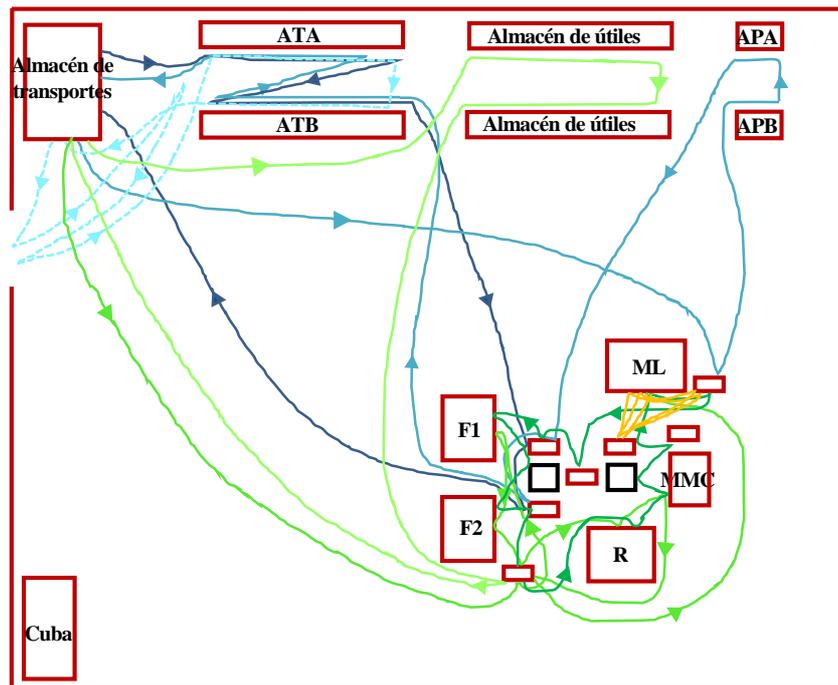


Figura 5. 19. Diagrama de espagueti de los movimientos de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 2. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3. Incidentes y tiempos asociados

Como en los casos anteriores, en la fabricación de las piezas pueden obtenerse algunas con ciertos defectos de calidad o precisión dimensional, lo que supondría volver a fabricar dichas piezas. Por ello, ha de tenerse en cuenta el tiempo de fabricación empleado en dicha tarea o tiempo de sobreprocesamiento. El procedimiento de obtención de dichos tiempos adicionales se detalla en el Anexo A, haciendo uso de las tablas A.19-A.27. A continuación se exponen los resultados obtenidos para las mismas 14 combinaciones posibles de piezas a fabricar que se consideraron tanto en la situación inicial como en la alternativa 1.

- Una pieza defectuosa de tipo A. Volver a producir una sola pieza de tipo A es similar a fabricar la pieza A1 (tabla 5.13) sin la espera a la entrada de la rectificadora y sin la espera para completar un lote de piezas para la limpieza, por lo que se tardan **4320 segundos** (1 h 12 min) en volver a fabricar una sola pieza de tipo A (tabla A.19).
- Una pieza defectuosa de tipo B. La nueva fabricación de una pieza de tipo B se lleva a cabo en **4050 segundos** (1 h 7 min 30 s), sin esperas de ningún tipo, al fabricarse una única pieza más (tabla A.21).
- Dos piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de dos piezas de tipo A conlleva un tiempo de **5570 segundos** (1 h 32 min 50 s), tal y como se muestra en la tabla A.19. Tras la verificación de la primera pieza se debe esperar hasta que finalice la verificación de la segunda pieza para que ambas piezas puedan ser introducidas simultáneamente en la máquina de limpieza.
- Dos piezas defectuosas de tipo B. Al igual que en el caso anterior, la fabricación de piezas del mismo tipo, sólo conlleva esperas en el proceso de limpieza hasta que se completa un lote. El tiempo de fabricación de estas dos nuevas piezas es de **5000 segundos** (1 h 23 min 20 s).

- Una pieza defectuosa de tipo A y otra de tipo B. La fabricación de una pieza de cada tipo es similar al procedimiento de fabricación de las piezas A1 y B1 de las tablas 5.13 y 5.14. El tiempo empleado para ello es de **5000 segundos** (1 h 23 min 20 s), tal y como se expone en la tabla A.23.
- Tres piezas defectuosas de tipo A. Volver a fabricar tres piezas de tipo A supone un tiempo adicional de **6820 segundos** (1 h 53 min 40 s).
- Tres piezas defectuosas de tipo B. Para fabricar tres piezas de tipo B se necesitan **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s).
- Dos piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. La secuencia de entrada a la célula de estas tres piezas es ABA. El nuevo procedimiento detallado en la tabla A.24 concluye que son necesarios **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s) para su obtención.
- Dos piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. La secuencia de entrada es ABB y, según la tabla A.23, se necesitan también **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s) para su fabricación.
- Cuatro piezas defectuosas de tipo A. La fabricación de cuatro piezas conlleva la agrupación de piezas en dos lotes de dos piezas cada uno para el proceso de limpieza (ya que como máximo pueden introducirse 3 piezas al mismo tiempo). La tabla A.20 indica que el tiempo de fabricación es de **8070 segundos** (2 h 14 min 30 s).
- Cuatro piezas defectuosas de tipo B. Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso anterior, la tabla A.22 muestra un tiempo total de **6900 segundos** (1 h 55 min).
- Dos piezas defectuosas de tipo A y dos de tipo B. La secuencia de entrada es en este caso ABBA y es similar a la producción de las piezas A1, B1, A2 y B2 mostradas en las tablas 5.13 y 5.14. El procedimiento detallado en la tabla A.25 expone que se necesitan **6900 segundos** (1 h 55 min) para su obtención.
- Tres piezas defectuosas de tipo A y una de tipo B. Para estas piezas la secuencia es ABAA y supone un tiempo de **6900 segundos**, el mismo que en el caso anterior.
- Tres piezas defectuosas de tipo B y una de tipo A. Por último, si se requiere volver a fabricar estos tipos de piezas, la secuencia es AB BB, necesitando también un total de **6900 segundos**.

De los resultados obtenidos en la sección A.3 del Anexo A se concluye que al fabricar lotes del mismo tipo de pieza, no se producen esperas a la entrada de la rectificadora y que cuando el *robot 2* saca la primera pieza de la rectificadora y la introduce en la máquina de verificación, seguidamente se dirige al estante PF, tardando en ello 10 segundos, para colocar la siguiente pieza en la rectificadora. Sin embargo, cuando se vuelven a fabricar piezas de ambos tipos, las piezas permanecen un tiempo de espera en el estante PF tras el fresado, debido a que el fresado de una pieza acaba antes que el rectificado de la pieza anterior. En cuanto acaba el rectificado de cualquier pieza, el *robot 2* la introduce en la máquina de verificación y coloca la siguiente pieza en la rectificadora.

De la tabla 5.13 se deduce que, en la fabricación de las primeras 20 piezas, la última que sale de la máquina de medición de coordenadas es la pieza la A10. Tras su verificación, el *robot 2* la coloca en el estante PL si ha superado dicho proceso o en el estante de piezas defectuosas, PD, en caso contrario. Hasta dicho momento, habrán transcurrido 20580 segundos, 5 horas y 43 minutos, desde el inicio de la fabricación. Puesto que la fabricación comienza a las 8:00 de la mañana, en el caso del primer turno, se tiene que el proceso de verificación de la última pieza concluye a las 13:43. Teniendo en cuenta que el *operario 1* tarda 10 minutos en realizar el recuento de piezas defectuosas para poder retirar los tochos que ya no se vayan a emplear, se determina que la fabricación de las nuevas piezas comience a las 14:00. En el caso del segundo turno, comenzaría a las 00:00.

En la tabla 5.21 se recogen todos los tiempos de sobreprocesamiento anteriores, necesarios para la fabricación de las nuevas piezas, así como la hora de comienzo y final, aproximadamente, en cada caso.

| Secuencia de piezas | Tiempo de sobreprocesamiento | | Comienzo de la fabricación | Hora final de la fabricación |
|---------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| A | 4320 | 1 h 12 min | 14:00 | 15:12 |
| B | 4050 | 1 h 7 min 30 s | | 15:08 |
| AA | 5570 | 1 h 32 min 50 s | | 15:33 |
| BB | 5000 | 1 h 23 min 20 s | | 15:24 |
| AB | | | | |
| AAA | 6820 | 1 h 53 min 40 s | | 15:54 |
| BBB | 5950 | 1 h 39 min 10 s | | 15:40 |
| ABA | | | | |
| ABB | | | | |
| AAAA | 8070 | 2 h 14 min 30 s | | 15:15 |
| BBBB | 6900 | 1 h 55 min | | 15:55 |
| ABBA | | | | |
| ABAA | | | | |
| ABBB | | | | |

Tabla 5. 21. Resumen de tiempos de sobreproducción y horas de comienzo y final de la fabricación de las distintas secuencias de piezas en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

Con la aparición de incidencias durante la producción de las piezas en la célula, los turnos de trabajo de los operarios se ven modificados respecto a las figuras 5.15-5.18.

En la tabla 5.22 se registra, para cada secuencia de piezas que se deba volver a fabricar, el tiempo de trabajo que el operario 3 emplearía en la fabricación de las nuevas piezas dentro de la célula. Dependiendo del número y tipo de piezas a fabricar nuevamente, la duración de la permanencia del operario en su puesto de trabajo será mayor o menor. El tiempo mínimo que el operario emplea en el proceso de limpieza de las nuevas piezas es de 25 minutos y 20 segundos. Puesto que el tiempo indicado es el requerido para trasladar las piezas desde el estante PL hasta la máquina de limpieza, limpiarlas, dejarlas secar y colocarlas en el estante PT, es evidente que se requiere el mismo tiempo para limpiar una sola pieza, dos o tres. Para la limpieza de cuatro piezas, dicho tiempo se incrementa, ya que las piezas se introducen en la máquina en lotes de dos. El máximo tiempo que el operario permanece en su puesto de trabajo es de 1 hora y 7 minutos, cuando se fabrican 4 piezas de tipo A.

| Secuencia de piezas | Tiempo de trabajo | |
|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Operario 3 | |
| A | 1520 segundos | 25 minutos y 20 segundos |
| B | | |
| AA | | |
| BB | | |
| AB | | |
| AAA | | |
| BBB | | |
| ABA | | |
| ABB | | |
| AAAA | 4020 segundos | 1 hora y 7 minutos |
| BBBB | 3420 segundos | 57 minutos |
| ABBA | | |
| ABAA | | |
| ABBB | | |

Tabla 5. 22. Tiempos de trabajo del operario 3 durante la fabricación de las nuevas piezas en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la tabla 5.23 se muestran todas las tareas, tanto si se realizan diariamente como si no (filas coloreadas). En ella, se cuantifica la duración de cada tarea sin tener en cuenta los descansos de los operarios ni el tiempo empleado en ponerse los EPIs necesarios en las operaciones que lo requieran.

| Tareas | | Operario 1 | Operario 2 | Operario 3 | Supervisor |
|--|--------------------|------------|------------|-----------------|------------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | - | - | 20 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 min | | - | - |
| | Útiles | - | 20 min | - | |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | - | 40 min | - | 20 min |
| Proceso de fabricación | Limpieza de piezas | - | - | 4 h 54 min 30 s | 2 h |
| Recuento de piezas defectuosas | | 10 min | | | - |
| Sobreproducción | Limpieza de piezas | - | - | 1 h 7 min | 30 min |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | - | - | 20 min | - |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 min | - | - | - |
| Almacenamiento de piezas defectuosas | | 15 min | | | |
| Vaciado de la cuba de desechos | | - | - | - | 20 min |

Tabla 5. 23. Duración de tareas y asignación de las mismas a los trabajadores en situaciones de sobreprocesamiento en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Se observan dos diferencias principales respecto a la situación ideal: la primera, es la ausencia de las labores de limpieza de la célula y de las máquinas, tras la fabricación de las piezas. Al igual que en el caso de sobreprocesamiento en la célula de la situación inicial, el tiempo adicional que los empleados deben emplear en las operaciones de sobreprocesamiento hacen imposibles incluir dichas labores de limpieza dentro del mismo turno. Por lo tanto, en los turnos donde se produzcan piezas defectuosas no se realiza la limpieza de la célula ni de las máquinas tras la fabricación.

La segunda diferencia es la asignación de la tarea de almacenamiento de piezas terminadas al *operario 3* en lugar de al *operario 1*, como se considera en los turnos en los que no se producen piezas defectuosas.

Por último, puede observarse que al *operario 1* se le asignan dos nuevas tareas: el recuento de piezas defectuosas, una vez acabada la verificación de las primeras 20 piezas del turno, y el almacenamiento de las mismas defectuosas en la cuba de desechos.

A partir de los datos recogidos en la tabla 5.23 se va a determinar el horario completo de cada trabajador durante el primer turno del día, incluyendo los descansos y la colocación de los equipos de protección necesarios, para el caso en que tengan que producirse cuatro piezas de tipo A, para así obtener el turno de trabajo asociado a las tareas de mayor duración. El segundo turno es completamente similar.

Operario 1

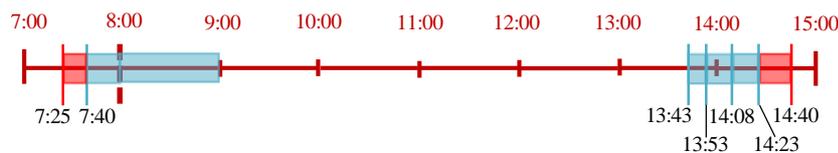


Figura 5. 20. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 1* comienza su jornada laboral a las 7:25 de la mañana. Antes de comenzar con sus tareas emplea 15 minutos en colocarse los EPIs oportunos para la manipulación de tochos y piezas. Tras esto, el operario inicia el aprovisionamiento de la célula con los tochos de material a las 7:40, para que a las 8:00 de comienzo la fabricación de las piezas dentro de la célula. Seguidamente, de 8:00 a 9:00 el operario realiza la recepción y almacenamiento de los tochos comprados los días destinados para ello, una vez cada dos meses. Al igual que en los turnos en los que no se producen piezas defectuosas, el período de tiempo comprendido entre las 9:00 y las 13:43 se destina a la realización de otras tareas no directamente relacionadas con la producción de las piezas dentro de la célula, por lo que no se detallan en la figura 5.20.

La verificación de las 20 primeras piezas que se fabrican concluye a las 13:43, por lo que cuando el operario inicia el recuento, ya están todas las piezas no conformes colocadas en el estante PD. Una vez hecho el recuento, para lo que emplea 10 minutos, el operario se dirige a los estantes de tochos TA y TB para coger los tochos sobrantes que no se emplearán en la nueva fabricación y los transporta a su almacén correspondiente. Tras acabar esta tarea a las 14:08, el operario se dirige al estante de piezas defectuosas y, tras colocarlas en una carretilla

manual, las lleva hasta la cuba de desechos. Esta operación se lleva a cabo en 15 minutos. Una vez devuelta la carretilla al almacén de transportes, el *operario 1* emplea 15 minutos en despojarse de los EPIs y en guardarlos debidamente para su próxima utilización. El segundo turno del día, comienza a las 16:25 y finaliza a las 23:40.

Operario 2

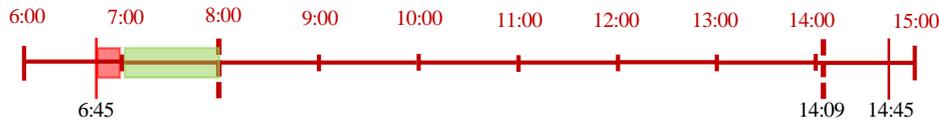


Figura 5. 21. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El turno de trabajo del *operario 2* no sufre ninguna modificación respecto al representado en la figura 5.16, correspondiente a los turnos en los que no se producen piezas defectuosas. Comienza a las 6:45 con la colocación de los EPIs correspondientes a las tareas de manipulación de materiales y herramientas. A las 7:00 el operario inicia el aprovisionamiento de los útiles que se requieren en la célula y luego procede a la preparación y puesta a punto de las máquinas, acabando a las 8:00.

Por tanto, su turno de trabajo es de 8 horas, por lo que finaliza su jornada a las 14:45. El segundo turno del día es muy similar al representado en la figura 5.21, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 15:45 y finalizando a las 23:45.

Operario 3

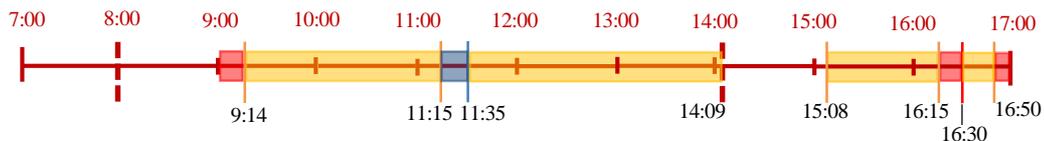


Figura 5. 22. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El *operario 3*, comienza su turno diario a las 9:00 de la mañana, colocándose los EPIs oportunos. Su primera tarea es la limpieza de piezas tras la verificación de las mismas, que comienza a 9:14 y finaliza a las 14:09. Durante todo este tiempo el *operario 3* dispone de un descanso de 20 minutos, entre las 11:15 y las 11:35. Este descanso tiene lugar mientras la producción de piezas sigue su curso; justo cuando el operario coloca el tercer lote de piezas limpias en el estante PT y antes de que tenga que introducir el siguiente lote en la máquina de limpieza.

La nueva fabricación de las piezas comienza a las 14:00, por lo que el trabajo relacionado con la limpieza de las mismas comienza a las 15:08, en el caso de que se produzcan cuatro piezas de tipo A. Si la secuencia de piezas a producir es cualquier otra, el horario de comienzo de esta tarea puede variar ligeramente. La limpieza de estas cuatro piezas, finaliza por tanto 1 hora y 7 minutos después, a las 16:15. En este instante el operario se cambia los EPIs necesarios para proceder al almacenamiento de piezas terminadas, el cual conlleva un total de 20 minutos. Tras esto y para finalizar, el operario guarda correctamente los EPIs empleados, finalizando su turno a las 17:00 y habiendo trabajado un total de 8 horas. El segundo turno del día es también similar al representado en la figura 5.22. Comienza a las 18:00 y finaliza a las 02:00.

Supervisor

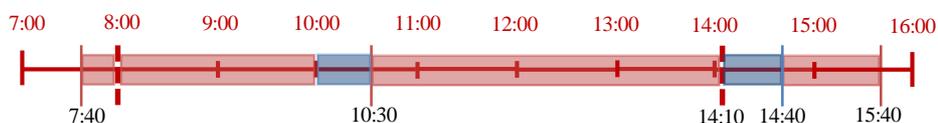


Figura 5. 23. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

El *supervisor* tampoco ve modificado su turno de trabajo respecto al indicado en la figura 5.18, correspondiente a los turnos sin sobreprocesamiento. Su turno de trabajo es de 8 horas tal y como se muestra en la figura 5.23. Dicho turno cuenta con dos descansos de 30 minutos: uno, desde las 10:00 hasta las 10:30, y otro, de 14:10 a 14:40. El segundo turno del día para el *supervisor* es similar al representado en la figura 5.23, con la misma duración de tareas y descansos, comenzando a las 16:40 y finalizando a las 00:40.

Diagrama de espagueti

Los movimientos de los operarios y las tareas asociadas a dichos movimientos se muestran en la figura 5.24 y en la tabla 5.24, respectivamente.

| Operario | Tarea | |
|----------|---|-------|
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ===== |
| | Almacenamiento de piezas defectuosas | ===== |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |

Tabla 5. 24. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.24. Fuente: Elaboración propia.

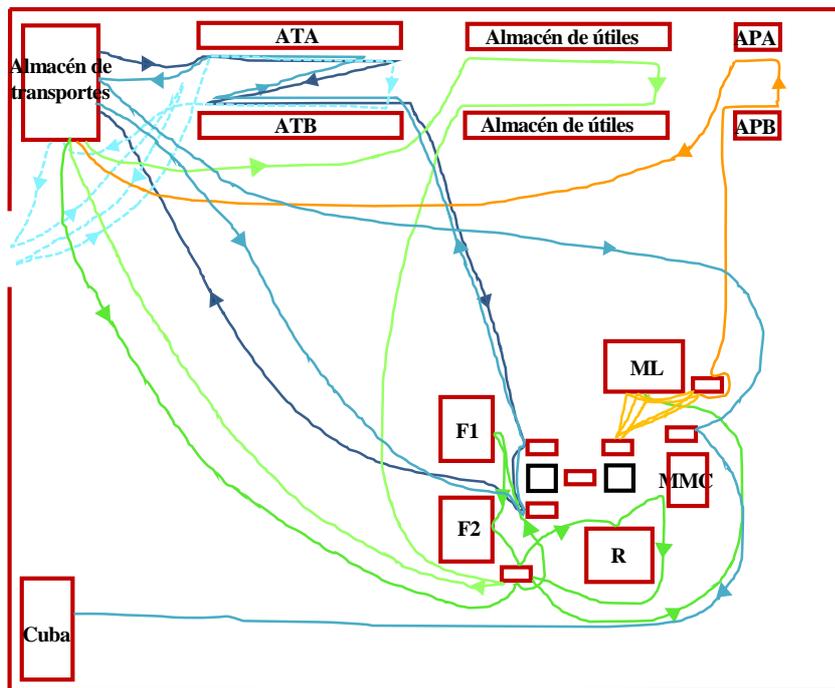


Figura 5. 24. Diagrama de espagueti de los movimientos de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 2, cuando se producen piezas defectuosas. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Alternativa 3: cambio de distribución de la planta de fabricación

Hasta el momento se han estudiado dos configuraciones diferentes de célula de fabricación como alternativas a la célula inicial descrita en el capítulo 4, para conseguir una reducción en cuanto al tiempo de espera de las piezas en el interior de la misma durante el proceso de fabricación. Esta tercera alternativa, sin embargo, busca la reducción de otros tipos de desperdicios: los movimientos, el transporte y la manipulación innecesarios de materiales por la planta de fabricación. Con esta tercera propuesta se propone una redistribución de las áreas de almacenamiento sin necesidad de cambiar la configuración inicial de la célula.

Para obtener la mejor solución a los desplazamientos entre almacenes y célula han de establecerse previamente los inconvenientes que produce el layout general de la planta en la situación inicial. De esta manera y para una mejor visualización, en la figura 5.25 se muestra de nuevo el layout de la situación inicial y los desplazamientos de los trabajadores durante un turno de trabajo, a partir del cual se van a establecer las razones por las que se debe modificar la distribución de la planta.

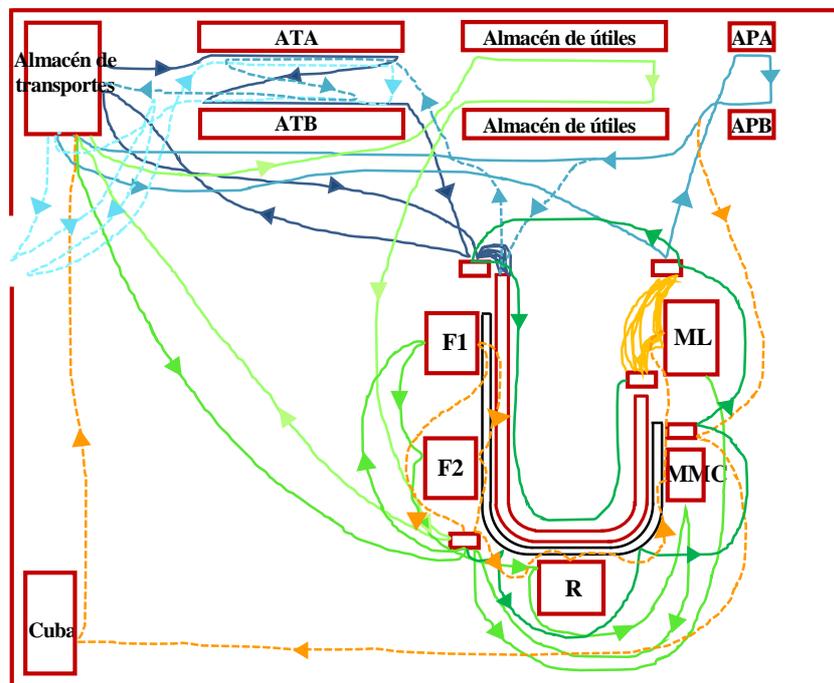


Figura 5. 25. Layout y desplazamientos de los operarios dentro de la planta de fabricación durante un turno. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se observa que la mayoría de las tareas conllevan el desplazamiento de los operarios hasta el almacén de transportes donde cogen y dejan las carretillas y transpaletas manuales tras desplazar de un sitio a otro el material correspondiente. Al ubicarse dicho almacén alejado de la célula, se producen desplazamientos muy largos, incrementando así el tiempo necesario en recorrerlos.

En segundo lugar, para que todos los almacenes quedasen emplazados en una zona de la planta destinada íntegramente al almacenamiento, se decidió emplear para ello la zona lateral izquierda a la entrada de la planta. Esto conlleva que durante el traslado de los útiles necesarios desde su almacén hasta el estante intermedio, el operario deba recorrer un amplio recorrido debido a la distancia entre ambos mobiliarios.

En tercer lugar, durante la puesta a punto de las máquinas puede apreciarse que el *operario 2* se desplaza hasta el estante intermedio de útiles en dos ocasiones desde diferentes puntos de la célula, para coger, soltar o cambiar los útiles que necesite para la preparación de cada máquina. Por tanto, el operario deberá dirigirse a éste tantas

veces como sea necesario desde cualquier punto de la célula. Al contar con un único estante de útiles, esto supone un aumento del número de desplazamientos que a priori pueden ser innecesarios.

En cuarto lugar, la tarea de almacenar las piezas defectuosas en la cuba de desechos, representada por la línea discontinua de color naranja en la figura 5.25, supone que el operario tenga que recorrer toda la planta para ir desde el estante de piezas defectuosas hasta dicha cuba. Asimismo, tras concluir esta tarea, tiene que desplazarse hasta el almacén de transportes, situado en el lado opuesto de la planta.

Todos estos desplazamientos suponen una saturación del espacio disponible en la planta, ya que en casi todo momento se están produciendo desplazamientos de materiales mediante carretillas manuales, lo cual limita y dificulta el espacio de los transeúntes.

Cambio de la distribución de la planta

Como soluciones a las observaciones e inconvenientes encontrados en el layout inicial de la planta se propone la siguiente distribución de los almacenes y una nueva ubicación de la célula.

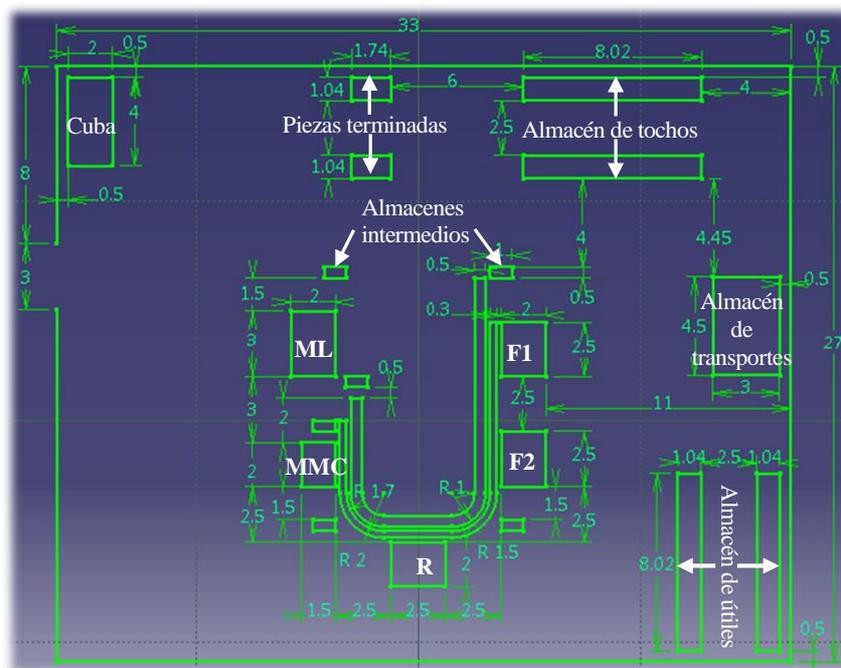


Figura 5. 26. Nuevo layout de la planta de fabricación propuesta en la alternativa 3. F1, fresadora 1; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

En la nueva distribución se ha respetado la orientación de la célula respecto a la planta de fabricación, quedando a la izquierda de la célula la entrada a la misma. Como puede observarse en la figura 5.26, ya no existe una zona compacta destinada únicamente al emplazamiento de los almacenes, si no que éstos se ubican en torno a la célula. No obstante, se mantiene la configuración enfrentada de las cajoneras y estanterías para dejar disponible el mayor espacio posible.

Por otra parte, la idea concebida en la situación inicial de situar los almacenes de tochos y piezas a la entrada y salida de la célula, respectivamente, sigue siendo un aspecto vigente en el nuevo layout. Esta decisión minimiza los desplazamientos entre almacenes y célula en las tareas de aprovisionamiento y almacenamiento de piezas fabricadas. Sin embargo, puede observarse que, en este caso, la entrada y salida de la célula se ha dispuesto de forma opuesta a la de la situación inicial, invirtiéndose el recorrido de material dentro de la célula y dejando situadas las máquinas encargadas de los procesos finales de fabricación más cerca de la entrada a la planta. De esta manera, se puede situar la cuba de desechos lo más próxima posible tanto al estante de piezas defectuosas como a dicha entrada. Con esto se consigue, por un lado, disminuir los desplazamientos del operario encargado del almacenamiento de piezas defectuosas en la cuba y, por otro lado, dejar disponible la zona inferior izquierda

de la planta (que en la situación inicial estaba ocupada por la cuba) para la realización de otras tareas y el movimiento de personas. Asimismo se agiliza el vaciado de la cuba debido a su proximidad a la entrada de la fábrica.

Un inconveniente que podría plantearse respecto a esta modificación recae en la recepción de material, ya que en esta configuración el almacén de tochos se encuentra más alejado de la entrada a la planta por la cual se reciben los pedidos. Esto supondría desplazamientos de mayor longitud y un aumento del tiempo de ejecución de dicha tarea. Sin embargo, la recepción de material se realiza con escasa frecuencia, una vez cada dos meses, por lo que las desventajas que pueda conllevar son inferiores a las ventajas comentadas.

El almacén de transportes, por su parte, queda emplazado en la pared opuesta a la entrada de la planta, exactamente, a 8 metros de la *fresadora 1* y a 4.45 metros de los almacenes de tochos y útiles. Esta nueva ubicación reduce los movimientos de los operarios en todas las tareas, ya que en todas ellas se requiere algún medio de transporte manual para el desplazamiento de material de un punto a otro.

Respecto al problema de la excesiva distancia, existente en la situación inicial de la planta, entre el almacén y el estante intermedio de útiles, se consigue minimizar dicho recorrido situando el almacén a 7 metros, aproximadamente, del estante intermedio junto a la *fresadora 2*, inicialmente ubicado a 16 metros del mismo.

Por último, como solución a la repetición y excesivo número de desplazamientos de los operarios durante las tareas de preparación y puesta a punto de las máquinas y de la limpieza de la célula y de las máquinas al estante intermedio de útiles, se considera oportuno disponer de otro estante idéntico al primero donde colocar también los útiles necesarios para la realización de dichas tareas. De esta forma, el primer estante de útiles se coloca tras la *fresadora 2*, abasteciendo a las fresadoras y a la rectificadora, mientras el segundo sirve a la máquina de medición de coordenadas, de la cual se encuentra situado a 1.5 metros, y a la máquina de limpieza.

Diagrama de espaguetti

Los cambios realizados en el layout de la planta influyen directamente en los movimientos y recorridos de los operarios durante la ejecución de las tareas. Para la visualización de dichos movimientos se representan en la figura 5.27 los recorridos de los tres operarios, empleando para ello el mismo código de colores de las figuras 5.25 y 5.26.

| FABRICACIÓN IDEAL | | |
|-------------------|---|-------|
| Operario | Tarea | |
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ----- |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| | Limpieza de la célula | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Limpieza de las máquinas | ===== |

Tabla 5. 25. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.27. Fuente: Elaboración propia.

| FABRICACIÓN CON SOBREPESAMIENTO | | |
|---------------------------------|---|-------|
| Operario | Tarea | |
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ----- |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas defectuosas en la cuba | ----- |

Tabla 5. 26. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.27. Fuente: Elaboración propia.

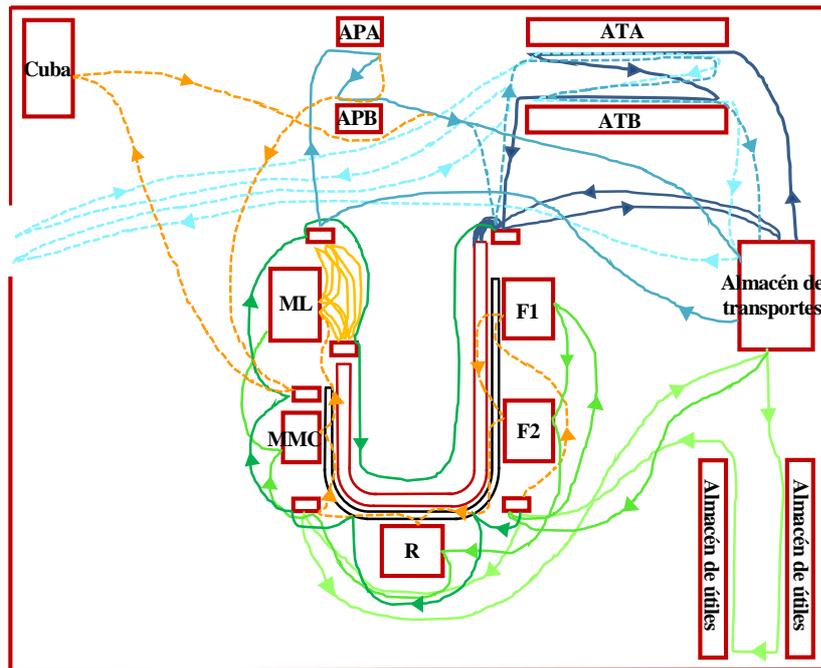


Figura 5. 27. Diagrama de espagueti de los operarios dentro de la nueva planta de fabricación propuesta como alternativa 3. ATA, almacén de tochos para piezas tipo A; ATB, almacén de tochos para piezas tipo B; APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R, rectificadora; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, los desplazamientos del *operario 1* se concentran en la parte superior de la planta, mientras que los del *operario 2* se agrupan en la parte inferior. Todos los movimientos del *operario 3* se llevan a cabo dentro de la célula, excepto el almacenamiento de piezas defectuosas que conlleva el desplazamiento hasta la cuba en la zona superior izquierda de la planta.

5.1.3.1. Producción: tiempos y proceso de fabricación

En esta nueva configuración de planta de fabricación se mantiene la duración de las operaciones y tareas dentro de la célula que se estableció en la descripción de la situación inicial de la célula en el capítulo anterior. Sin embargo, al modificar la ubicación de los sistemas de almacenamiento y la orientación de la célula respecto a los mismos, el tiempo de ejecución de las tareas externas a la célula también se ve alterado. A continuación se detallan los nuevos tiempos asociados a dichas tareas para establecer finalmente el tiempo de producción total, tanto para las situaciones en las que no se producen piezas defectuosas, producción ideal, como para las que sí requieren operaciones de sobreprocesamiento.

PRODUCCIÓN IDEAL

- Recepción y almacenamiento de tochos

Con la modificación de la ubicación de los almacenes de tochos y transportes, éstos se sitúan más alejados de la entrada a la planta por la que se reciben los pedidos. Esto hace que el operario encargado de la recepción de material deba cubrir una distancia mayor para realizar la misma tarea. Una vez el pedido llega a las instalaciones de la planta, el operario transporta y almacena los 1000 tochos en su correspondiente almacén, de la misma forma que lo hacía en la situación inicial. La tarea tiene una duración de **1 hora y 15 minutos**.

- Aprovisionamiento de la célula

El tiempo en aprovisionar los estantes intermedios de tochos y útiles del interior de la célula también se modifica tras la reubicación de los almacenes. Al estar estos más próximos a dichos estantes intermedios, el tiempo en realizar estas tareas será menor respecto al de la situación inicial. Por tanto, se estima una reducción de 5 minutos en cada una de ellas, es decir, las tareas de aprovisionamiento de tochos y de útiles se realiza en **15 minutos** cada una.

- Preparación y puesta a punto de las máquinas

La puesta a punto de las máquinas se reduce a **30 minutos**, al disponer de un segundo estante intermedio de útiles que ayuda a reducir los desplazamientos del operario dentro de la célula. Durante esta tarea se realizan las labores de engrase de las máquinas y comprobación de herramientas y útiles en cada una de ellas.

- Tiempo de fabricación dentro de la célula

El tiempo de fabricación de las 20 piezas no sufre modificación ninguna, puesto que en el nuevo layout de la planta se ha mantenido la configuración íntegra de la célula de la situación inicial. Por tanto, el tiempo de fabricación de las piezas es de **6 horas y 10 minutos**.

- Almacenamiento de piezas terminadas

Una vez limpias y secas las piezas fabricadas deben ser almacenadas en su almacén correspondiente. Para ello, el operario, tras coger una carretilla manual del almacén de transportes se desplaza hasta el estante de piezas terminadas y las lleva hasta las estanterías del almacén de piezas donde las ubica según el tipo de pieza que sean. El tiempo empleado en realizar esta tarea se reduce en 5 minutos debido a la proximidad de los almacenes respecto a la célula, lo que supone un tiempo de **15 minutos**.

- Devolución de tochos no usados

En los turnos en los que no se producen piezas defectuosas, tras el almacenamiento de piezas fabricadas el operario se dirige al estante de tochos para devolver los 4 tochos de cada tipo no usados a su almacén. Tras esto, deja la carretilla manual en el almacén de transportes. Esta tarea tiene una duración de **10 minutos**.

- Limpieza de la célula y de las máquinas

La limpieza de la célula, tarea que se realiza en cada turno, siempre que no se produzcan piezas defectuosas, apenas reduce su tiempo de ejecución, por lo que se destinan **40 minutos** en limpiar las zonas de trabajo tras la fabricación de las piezas. Asimismo, la limpieza de las máquinas que se realiza una vez por semana en algún turno en el que no se requieran operaciones de sobreprocesamiento, tampoco modifica su tiempo de ejecución, siendo este de **una hora**.

En la tabla 5.27 se muestran los tiempos asociados a cada tarea en las configuraciones de la situación inicial, descrita en el capítulo 4, y en la propuesta en esta tercera alternativa.

| PRODUCCIÓN IDEAL | | | |
|--|--------|--------------------|---------------|
| Tareas | | Situación inicial | Alternativa 3 |
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora | 1 hora 15 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 minutos | 15 minutos |
| | Útiles | 20 minutos | 15 minutos |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | 40 minutos | 30 minutos |
| Proceso de fabricación | | 6 horas 10 minutos | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 20 minutos | 15 minutos |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 15 minutos | 10 minutos |
| Limpieza de la célula | | 40 minutos | |
| Limpieza de las máquinas | | 1 hora | |

Tabla 5. 27. Comparativa de los tiempos de producción ideal para la configuración de planta de la situación inicial y la propuesta como alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

PRODUCCIÓN CON SOBREPESAMIENTO

Cuando en un turno se producen piezas defectuosas, al conjunto de tareas descritas durante la producción ideal se deben añadir el almacenamiento de piezas defectuosas y el vaciado de la cuba de desechos y eliminar las tareas de limpieza. La duración de dichas tareas se modifica también respecto a la situación inicial debido a la reubicación de los almacenes en la planta.

- Almacenamiento de piezas defectuosas

La nueva ubicación de la cuba de desechos acorta la distancia desde su posición hasta el estante de piezas defectuosas, lo que supone una disminución de 5 minutos en el tiempo de ejecución de dicha tareas. Por lo que la duración de esta tarea es de **10 minutos**.

- Vaciado de la cuba de desechos

Del mismo modo, la nueva disposición de la cuba dentro de la planta la sitúa a escasos metros de la entrada, por lo que el vaciado de la misma requiere de tan sólo **15 minutos**.

En la tabla 5.28 se muestran los tiempos asociados a las tareas de la producción con sobreprocesamiento en las configuraciones de la situación inicial y de la propuesta en esta tercera alternativa.

| PRODUCCIÓN CON SOBREPESAMIENTO | | |
|--|----------------------------------|---------------|
| Tareas | Situación inicial | Alternativa 3 |
| Recepción y almacenamiento de los tochos | 1 hora | 1 hora 15 min |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 minutos |
| | Útiles | 20 minutos |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | 40 minutos | 30 minutos |
| Proceso de fabricación | 6 horas 10 minutos | |
| Recuento de piezas defectuosas | 10 minutos | |
| Fabricación de las nuevas piezas | 2 horas 19 minutos (como máximo) | |
| Almacenamiento de piezas terminadas | 20 minutos | 15 minutos |
| Devolución tochos no usados al almacén | 15 minutos | 10 minutos |
| Almacenamiento de piezas defectuosas | 15 minutos | 10 minutos |
| Vaciado de la cuba de desechos | 20 min | 15 min |

Tabla 5. 28. Comparativa de los tiempos de producción con sobreprocesamiento para la configuración de planta de la situación inicial y la propuesta como alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

Resulta conveniente recordar que la duración de la fabricación de las nuevas piezas que se especifica en la tabla anterior, 2 horas y 19 minutos, hace referencia a la fabricación de cuatro piezas de tipo A, ya que es la combinación con mayor tiempo de fabricación. La duración del resto de combinaciones se muestra en la tabla 4.8 del capítulo 4 y la tabla 5.9 del capítulo 5.

5.1.3.2. Turnos de trabajo y tiempo de descanso de los operarios

La reducción de la mayor parte de las tareas conlleva la modificación de los turnos de los operarios tal y como se detallaron en la situación inicial. A continuación se exponen los nuevos turnos de trabajo y descansos de cada operario, primero para la situación ideal y luego, para los casos de producción con sobreprocesamiento.

- **PRODUCCIÓN IDEAL**

Operario 1

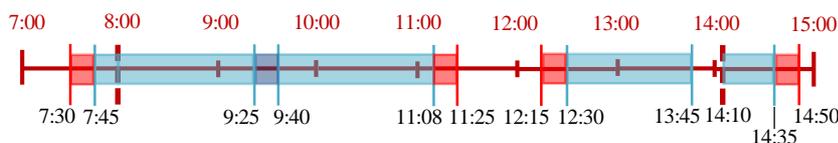


Figura 5. 28. Turno de trabajo del operario 1 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

En esta alternativa, el *operario 1* comienza su jornada laboral a las 7:30 y tras emplear 15 minutos en colocarse los equipos de protección necesarios comienza el aprovisionamiento de tochos a las 7:45, el cual finaliza 15 minutos después. El tiempo de fabricación de las piezas no se ve alterado, comenzando dicha fabricación a las 8:00 y finalizando a las 14:10. Como consecuencia, el tiempo dedicado a la colocación de tochos en la cinta tampoco se ve alterado. La recepción de tochos, sin embargo, se incrementa en 15 minutos, por lo que comienza a las 12:30 y finaliza a las 13:45. Tras la fabricación de las piezas el *operario 1* emplea 25 minutos en almacenar las piezas ya fabricadas y en devolver los tochos no usados a su almacén.

El turno completo de trabajo del *operario 1* finaliza a las 14:50, por lo que se ha reducido 10 minutos respecto a la situación inicial. Por otra parte, el segundo turno del día es completamente similar al representado en la figura 5.28, comenzando a las 16:30 y finalizando a las 23:50.

Operario 2

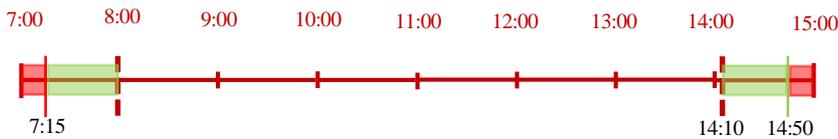


Figura 5. 29. Turno de trabajo del operario 2 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

La única diferencia respecto a la situación inicial es la reducción de las tareas de aprovisionamiento de útiles y de puesta a punto de las máquinas. Ambas tareas se realizan en 45 minutos, por lo que el *operario 2* inicia su turno a las 7:00 y tras colocarse los EPIs comienza con dichas tareas a las 7:15. Tras la fabricación de las 20 piezas que concluye a las 14:10, este operario se encarga de la limpieza general de la célula, tardando en ello 40 minutos. El tiempo necesario para quitarse y guardar los EPIs que ha empleado es de 15 minutos, por lo que finaliza su trabajo a las 15:00.

El turno se ha reducido 15 minutos, ya que en la situación inicial, éste comenzaba a las 6:45. El segundo turno comienza a las 16:00 y finaliza a las 00:00.

Operario 3

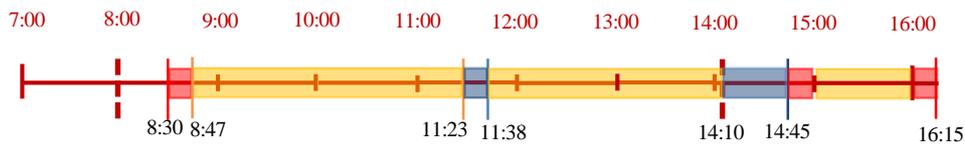


Figura 5. 30. Turno de trabajo del operario 3 en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

El turno del *operario 3* no se ve alterado, ya que la duración de la limpieza de las piezas, y la limpieza de las máquinas es la misma que la considerada en la situación inicial. Asimismo el segundo turno comienza a las 17:45 y finaliza a las 01:15.

Supervisor

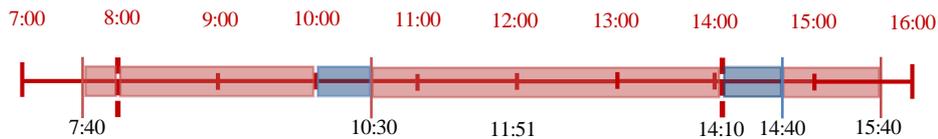


Figura 5. 31. Turno de trabajo del supervisor en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

El turno del supervisor tampoco se ve modificado, ya que las tareas de control y supervisión no dependen de la reubicación de los almacenes en la planta. El segundo turno comienza a las 16:40 y finaliza a las 00:40.

▪ PRODUCCIÓN CON SOBREPESAMIENTO

Operario 1

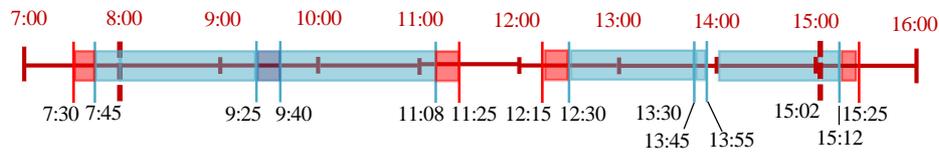


Figura 5. 32. Turno de trabajo del operario 1 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

En esta alternativa, cuando se precisan operaciones de sobreprocesamiento, las tareas que se ven modificadas en cuanto a su duración respecto a la situación inicial son: el aprovisionamiento, la recepción y la devolución de tochos a su almacén. El aprovisionamiento de tochos se lleva a cabo en 15 minutos, desde las 7:45 hasta las 8:00. La recepción, al igual que en la producción ideal abarca desde las 12:30 hasta las 13:45. Esto supone que el recuento de piezas defectuosas se retrase un minuto, ya que en la situación inicial esta tarea comenzaba a las 13:44. La devolución de tochos a su almacén comienza a las 15:02, justo después de que el *operario 1* termine la colocación de los tochos de las nuevas piezas en la cinta, y finaliza 10 minutos más tarde, a las 15:12.

El turno es de 8 horas aproximadamente, exactamente, 10 minutos más corto que el turno de la situación inicial. El segundo turno comienza a las 16:30 y finaliza a las 00:25.

Operario 2

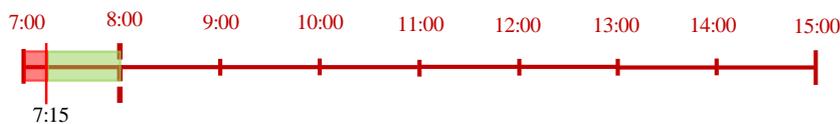


Figura 5. 33. Turno de trabajo del operario 2 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia con respecto a la situación inicial, al igual que en el caso sin sobreprocesamiento, es la duración de las tareas de aprovisionamiento de útiles y puesta a punto de las máquinas, que se realizan ambas en 25 minutos. El turno es de 8 horas, de 7:00 a 15:00. A partir de las 8:00 este operario realiza otras actividades relacionadas indirectamente con la producción, tal y como se comentó para la situación inicial. El segundo turno es similar al mostrado en la figura 5.33, abarcando desde las 16:00 hasta las 00:00.

Operario 3

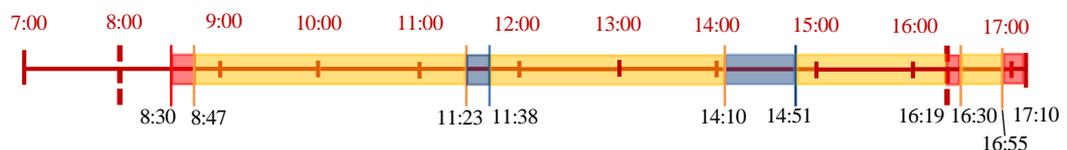


Figura 5. 34. Turno de trabajo del operario 3 cuando se producen cuatro piezas defectuosas de tipo A en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

Con la reubicación de la cuba de desechos y de los almacenes, la duración de las tareas de almacenamiento de piezas defectuosas y piezas terminadas se reduce en 5 minutos cada una, respecto a la situación inicial. De esta forma tras el proceso de limpieza en el interior de la célula de las nuevas piezas y el cambio de EPIs, ambas tareas se realizan en 25 minutos, desde las 16:30 hasta las 16:55. El turno de trabajo de este operario finaliza como máximo a las 17:10, una vez haya guardado los EPIs empleados. El segundo turno del día es también similar al representado en la figura 5.34, comienza a las 17:45 y finaliza a las 02:20.

Supervisor

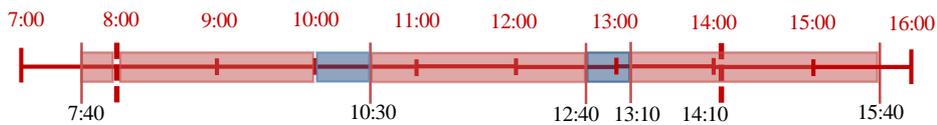


Figura 5. 35. Turno de trabajo del supervisor cuando se producen piezas defectuosas en la célula de la alternativa 3. Fuente: Elaboración propia.

El turno del supervisor no se modifica respecto al de la situación inicial, ya que como se comentó para los turnos donde no se producen piezas defectuosas, la reubicación de los almacenes no influye en las tareas de control y supervisión de este empleado. El segundo turno del día comienza a las 16:40 y finaliza a las 00:40.

5.2. Comparación de las alternativas con la situación inicial

Una vez desarrolladas las alternativas propuestas como solución a la eliminación o reducción de los desperdicios que se producen durante el proceso productivo en la planta de fabricación en general, resulta conveniente comparar cada alternativa con la situación inicial para poder decidir la opción más idónea.

Alternativa 1 vs situación inicial

La duplicación de maquinaria, propuesta como primera alternativa a la reducción del tiempo de espera de las piezas durante el proceso de fabricación, conlleva la modificación parcial de la configuración inicial de la célula, al aumentar el número de máquinas. De este modo con la adquisición de una nueva rectificadora y un nuevo robot móvil se obtienen los siguientes cambios:

- Aumento del área ocupada por la célula, pasando de 14x11.5 m² en la situación inicial a 14.4x14 m². Esto conlleva una pequeña disminución del espacio libre en la planta de producción.
- Disminución del tiempo de fabricación en 1 hora y 35 minutos, pasando de 6 horas, 9 minutos y 14 segundos, en la situación inicial, a 4 horas y 34 minutos en la célula con duplicación de maquinaria. Con esta disminución se reduce el tiempo de entrega del producto al cliente.
- Disminución del tiempo de espera medio de las piezas dentro de la célula en 2453 segundos (40 minutos y 53 segundos).
- Eliminación de tiempos de espera a la entrada de la rectificadora y generación de nuevos tiempos de espera a la entrada de la máquina de medición de coordenadas.
- El coste asociado a esta alternativa es la adquisición de una nueva rectificadora, un nuevo robot y la ampliación de la cinta transportadora de material y del carril guía de los robots.

Alternativa 2 vs situación inicial

El layout centrado en robots para la célula es también una propuesta para la reducción del tiempo de fabricación y del tiempo que las piezas permanecen paradas dentro del proceso productivo. Para ello, se eliminan la cinta transportadora de material, el carril guía y los pequeños robots móviles y se instalan fijos en el centro de la célula dos robots grandes que sirven a todas las máquinas. Los principales cambios que se producen respecto a la situación inicial son:

- Pérdida de la forma en forma de U de la célula, ya que en esta nueva configuración las máquinas se colocan alrededor de los robots.
- Reducción del área ocupada por la planta, pasando de 14x11.5 m² en la situación inicial a 11x9.5 m². Esta disminución conlleva el aumento del espacio libre disponible en la planta.
- Aumento del número de estantes intermedios, donde los robots posicionan los tochos y las piezas tras cada operación. En la situación inicial había un total de 5, mientras que en este nuevo layout se disponen de 7.
- Disminución del tiempo de fabricación en 54 segundos.

- Aumento del tiempo de espera medio de las piezas en el interior de la célula en 516 segundos.
- El coste asociado a esta alternativa recae en la adquisición de los dos nuevos robots industriales y en dos estantes intermedios.

Alternativa 3 vs situación inicial

La modificación de la distribución de los almacenes dentro de la planta de fabricación sugerida para la reducción de los desplazamientos de los operarios dentro de la misma no altera el layout de la célula, siendo ésta idéntica a la de la situación inicial. Los principales cambios que resultan de la implantación de esta propuesta son:

- Disminución de la duración de las tareas externas a la célula: aprovisionamiento, almacenamiento de piezas, limpieza, etc. No obstante, la recepción de material requiere de 15 minutos más que en la situación inicial para llevarse a cabo, debido al aumento de distancia entre el almacén de tochos y la entrada a la planta.
- Aumento del número de estantes intermedios en la célula. En esta propuesta se dispone de dos estantes de útiles en lugar de uno solo, siendo el número total de estantes de 6. De esta forma, se reducen los desplazamientos del operario en la tarea de la puesta a punto de las máquinas.
- Acortamiento de las distancias entre almacenes y célula, por lo que se reducen los desplazamientos de los operarios.
- Traslado de la posición de la célula respecto a la planta de fabricación. Inicialmente, la célula se ubicaba a 5 metros de los almacenes y de la pared derecha de la planta, a 3 metros de la pared inferior y a 16.5 metros de la pared izquierda. Con la reubicación de los almacenes, la célula ahora queda emplazada a 4 metros de los almacenes situados en la pared superior de la planta; a 11 metros de la pared derecha y por tanto a 6 metros aproximadamente del almacén de útiles; a 4 metros aproximadamente de la pared inferior de la planta y a 10.5 metros de la pared izquierda.
- El coste asociado a esta alternativa se percibe en la adquisición de un nuevo estante donde albergar útiles y en la reubicación de los almacenes, incluyendo el traslado de la célula.

| Características de la célula | Situación inicial | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 |
|---|------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Tipo de layout de la célula | En forma de U | En forma de U | Centrado en robots | En forma de U |
| Área ocupada por la célula en la planta | 14x11.5 m ² | 14.4x14 m ² | 11x9.5 m ² | 14x11.5 m ² |
| Número de máquinas | 5 | 6 | 5 | 5 |
| Número de robots | 2 | 3 | 2 | 2 |
| Tipo de robot | Móvil | Móvil | Fijo | Móvil |
| Número de estantes intermedios | 5 | 5 | 7 | 6 |
| Tiempo de fabricación en la célula | 6 h 10 min | 4 h 34 min | 6 h 9 min | 6 h 10 min |
| Tiempo medio de espera de las piezas en la célula | 1 h 20 min | 39 min | 1 h 23 min | 1 h 20 min |
| Lugar del cuello de botella | Rectificadora | Máquina de medición de coordenadas | Rectificadora | Rectificadora |
| Cambio de la ubicación de los almacenes | - | No | No | Sí |
| Tipo de desperdicios reducidos | - | Esperas | Manipulación | Desplazamientos |

Tabla 5. 29. Comparativa de las características de la célula en cada situación. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5.29 se comparan las principales características de la célula de cada alternativa y de la situación inicial para resumir y sintetizar lo expresado anteriormente. De esta forma se concluye lo siguiente:

- Con la duplicación de maquinaria se reduce considerablemente el tiempo de fabricación, así como las esperas a la entrada de la rectificadora. Como desventaja se presenta la inversión inicial en la adquisición de la maquinaria nueva.

- Con el layout centrado en robots se automatiza la tarea de colocación de tochos en las fresadoras, por lo que se simplifican las tareas de manipulación por parte de los operarios. Sin embargo, esta alternativa apenas disminuye el tiempo de fabricación de las piezas y supone una costosa inversión inicial al adquirir e instalar los robots fijos.
- El cambio de ubicación de los almacenes y el emplazamiento de la célula dentro de la planta reduce la duración de las tareas externas a la célula y los desplazamientos de los operarios, además de que no supone ninguna inversión inicial. Por el contrario, no se reduce el tiempo de fabricación de las piezas, por lo que el tiempo de espera también se mantiene respecto a la situación inicial.

5.3. Solución: alternativa elegida

Para la elección de la mejor alternativa ha de tenerse en cuenta tanto el tipo y el grado de reducción de desperdicios como el coste de implantación de dicha solución. El principal desperdicio que se pretende reducir son las esperas que paralizan la continuidad del flujo productivo y que suponen un aumento del tiempo de producción y, por consiguiente, un retraso en los plazos de entrega al cliente. El exceso de movimientos en la planta por mal emplazamiento de los almacenes o por mantener los espacios de trabajo desorganizados es otro de los desperdicios que se pretende reducir.

Conseguir ambas metas resulta difícil con la elección de una sola de las alternativas anteriores, por lo que se decide adoptar simultáneamente las alternativas 1 y 3, es decir, adquirir una rectificadora y un robot móvil para eliminar el cuello de botella del proceso de rectificación y reducir el tiempo de fabricación al mismo tiempo que se reubican los almacenes, se invierte el sentido de flujo de material en la célula y se adquiere un nuevo estante de útiles, tal y como se detalla en la subsección 5.1.3.

En la figura 5.36 se muestra la distribución final que adquiere la planta de fabricación tras realizar las modificaciones pertinentes.

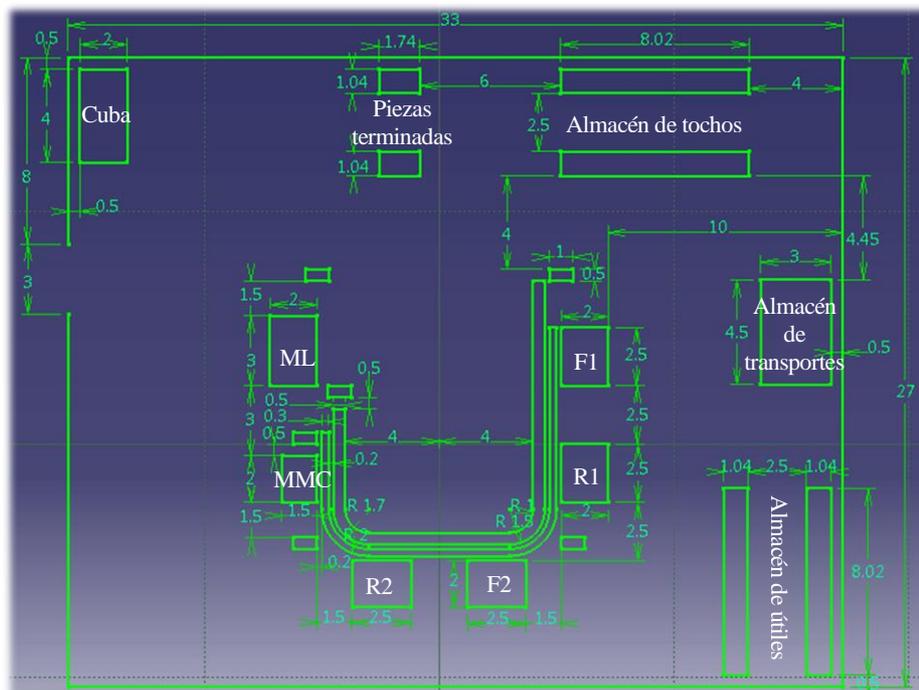


Figura 5. 36. Layout final de la planta de fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Proceso de fabricación

El proceso de fabricación completo, desde la recepción de tochos hasta el almacenamiento de las piezas fabricadas y la limpieza de las instalaciones, queda definido por las alternativas 1 y 3 descritas en la sección 5.1, tanto para las situaciones en las que se producen piezas defectuosas como para las que no. De este modo, la duración de las tareas externas a la célula es la detallada en la subsección 5.1.3, mientras que la duración de la fabricación de las piezas en el interior de la célula es igual a la que se especificaba en la subsección 5.1.1 para la célula con duplicación de maquinaria. A modo de resumen, la tabla 5.30 muestra la duración de cada una de las tareas para los dos casos de fabricación, así como el operario que realiza cada una de ellas.

| Tareas | | Fabricación ideal | Fabricación con operaciones de sobreprocesamiento | Operario |
|--|--------|--------------------|---|----------|
| Recepción y almacenamiento de los tochos | | 1 hora 15 minutos | | 1 |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 15 minutos | | 1 |
| | Útiles | 15 minutos | | 2 |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | | 30 minutos | | 2 |
| Proceso de fabricación | | 4 horas 34 minutos | | - |
| Recuento de piezas defectuosas | | - | 10 minutos | 1 |
| Fabricación de las nuevas piezas | | - | 2 horas 19 minutos (como máximo) | - |
| Almacenamiento de piezas terminadas | | 15 minutos | | 1/3 |
| Devolución tochos no usados al almacén | | 10 minutos | | 1 |
| Almacenamiento de piezas defectuosas | | - | 10 minutos | 3 |
| Limpieza de la célula | | 40 minutos | - | 2 |
| Limpieza de las máquinas | | 1 hora | - | 3 |
| Vaciado de la cuba de desechos | | 15 min | | - |

Tabla 5. 30. Duración de las tareas y operarios asociados a cada una de ellas en las situaciones de fabricación ideal y fabricación con piezas defectuosas. Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior han de puntualizarse tres aspectos:

- Las tareas primera, penúltima y última no se realizan siempre en cada turno. La limpieza de las máquinas se realiza una vez a la semana en algún turno donde no se produzcan piezas defectuosas, mientras que la recepción de tochos y el vaciado de la cuba se llevan a cabo una vez cada dos meses.
- La duración de la fabricación de las nuevas piezas, 2 horas y 19 minutos, corresponde al tiempo empleado en fabricar cuatro piezas de tipo A. Cualquier otra combinación de piezas a producir conllevaría un tiempo de fabricación menor.
- El almacenamiento de piezas terminadas o fabricadas se lleva a cabo por un operario diferente según si se producen piezas defectuosas o no. En las situaciones ideales de fabricación, dicha tarea es realizada por el *operario 1*, mientras que si se producen defectos en las piezas, la realiza el *operario 3*.

Desplazamientos

Para el layout final de la planta se han tenido en cuenta las modificaciones propuestas por las alternativas 1 y 3, por lo que los desplazamientos de los operarios y movimientos de materiales por la planta de fabricación no coinciden exactamente con los presentados en los *Diagramas de espagueti* de ambas alternativas.

A continuación, se detallan dichos diagramas para la situación final de producción, tanto en las situaciones que se producen piezas defectuosas como en las que no. Como leyenda a los diagramas se proponen las tablas 5.31 y 5.32 donde se le asocia a cada tipo de línea representada la tarea a la que corresponde y el operario que la realiza.

| FABRICACIÓN IDEAL | | |
|-------------------|---|-------|
| Operario | Tarea | |
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Almacenamiento de piezas fabricadas | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ----- |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| | Limpieza de la célula | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Limpieza de las máquinas | ----- |

Tabla 5. 31. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción ideal y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.37. Fuente: Elaboración propia.

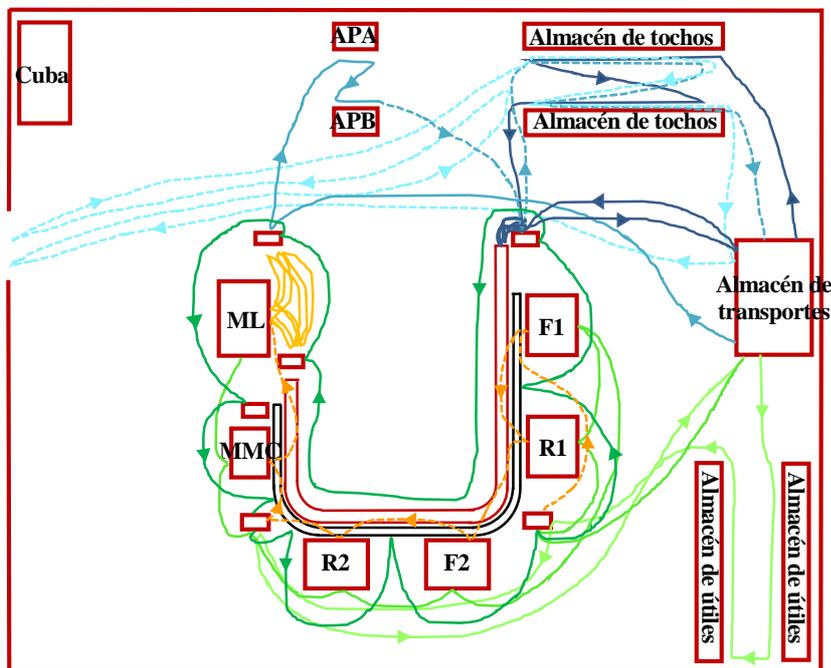


Figura 5.37. Diagrama de espagueti de los desplazamientos de los operarios en la situación final. APA, almacén de piezas tipo A; APB, almacén de piezas tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; F2, fresadora 2; R1, rectificadora 1; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

| FABRICACIÓN CON SOBREPESAMIENTO | | |
|---------------------------------|---|-------|
| Operario | Tarea | |
| 1 | Recepción de tochos | ----- |
| | Aprovisionamiento de tochos | ===== |
| | Colocación de los tochos en la cinta | ===== |
| | Devolución de tochos no usados a su almacén | ----- |
| | Almacenamiento de piezas defectuosas en la cuba | |
| 2 | Aprovisionamiento de útiles | ===== |
| | Preparación y puesta a punto de máquinas | ===== |
| 3 | Proceso de limpieza de las piezas | ===== |
| | Almacenamiento de piezas terminadas | ===== |

Tabla 5. 32. Resumen de las tareas asociadas a cada operario durante los turnos de producción con sobreprocesamiento y tipo de línea que representa sus movimientos en la figura 5.37. Fuente: Elaboración propia.

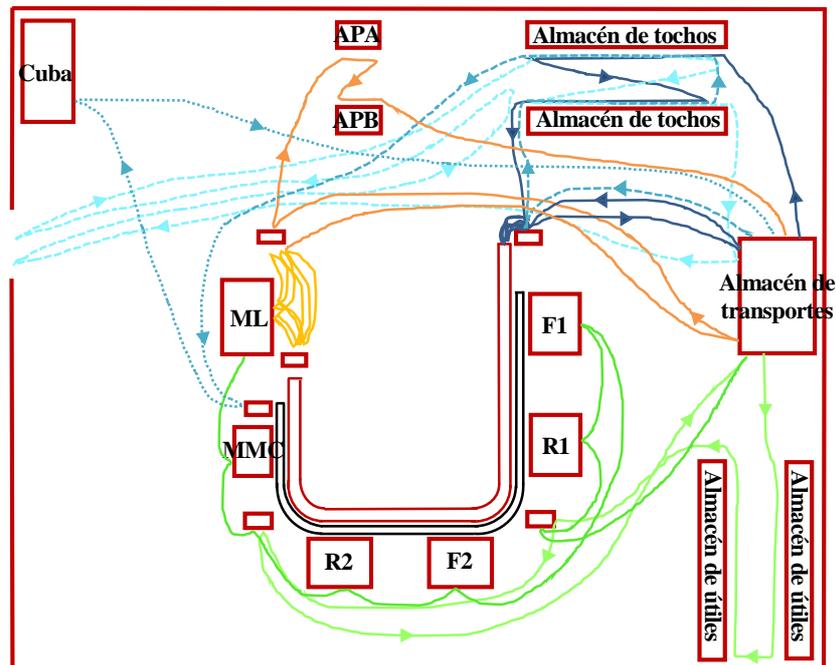


Figura 5. 38. Diagrama de espagueti de los desplazamientos de los operarios en la situación final cuando se producen piezas defectuosas. APA, almacén de piezas de tipo A; APB, almacén de piezas de tipo B; F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R1, rectificadora 1; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

Turnos de trabajo y descanso de los trabajadores

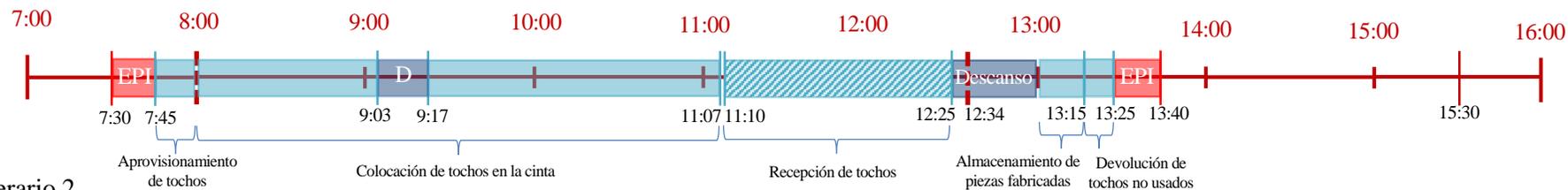
Los turnos de trabajo son también una combinación de los mostrados para la producción con duplicación de maquinaria, detallada en la alternativa 1, y para la producción tras la reubicación de los almacenes en la planta que se describía en la alternativa 3. De la primera alternativa se mantiene la duración de las tareas y descansos realizados por los *operarios 1 y 3* dentro de la célula, mientras que de la tercera alternativa se ha conservado la distribución temporal de las tareas externas a la misma.

En las figuras 5.39 y 5.40 se representan los turnos de los trabajadores para las situaciones en las que no se producen piezas defectuosas y en las que sí, respectivamente, por lo cual es necesario volver a fabricar dichas piezas y, por consiguiente, realizar operaciones de sobreprocesamiento. En dichas figuras se muestran las tareas, mediante rectángulos de diferentes colores, en una línea de tiempo que abarca desde las 7:00 hasta las 16:00 horas. Los rectángulos rojos corresponden a la colocación, desprendimiento y guardado de los EPIs o equipos de protección individual que cada trabajador debe emplear en las diferentes tareas que realiza. Los rectángulos azules representan los diferentes descansos durante los turnos de cada empleado. Por otra parte, las tareas que no se realizan diariamente en cada turno, como la recepción de tochos y la limpieza de las máquinas, se diferencian de las demás por el trazado a rayas que las representa.

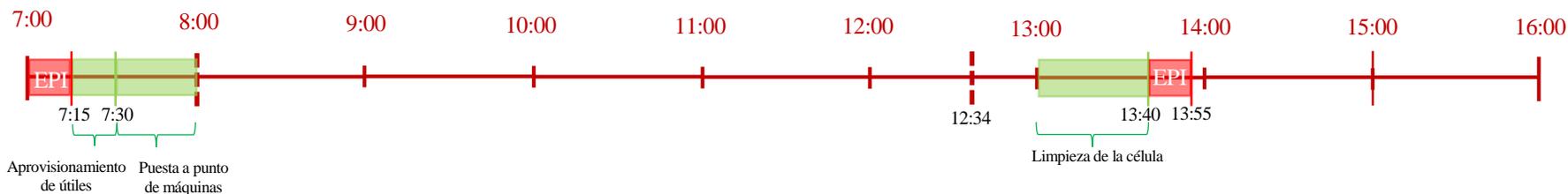
Por último, cabe mencionar que el segundo turno de los trabajadores es similar al mostrado en las figuras 5.39 y 5.40, sin más que cambiar en las líneas de tiempo la hora de comienzo por las 16:00 y la hora de finalización, por la 1:00 del día siguiente.

FABRICACIÓN IDEAL

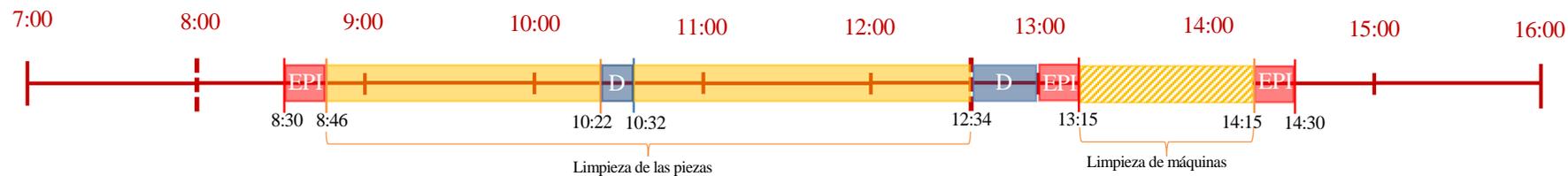
Operario 1



Operario 2



Operario 3



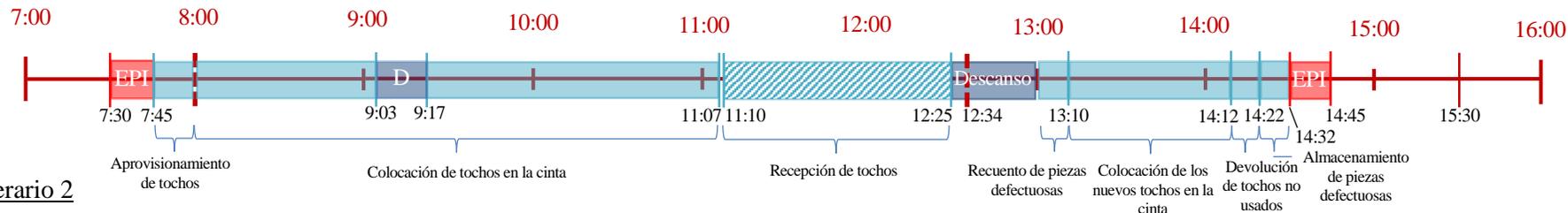
Supervisor



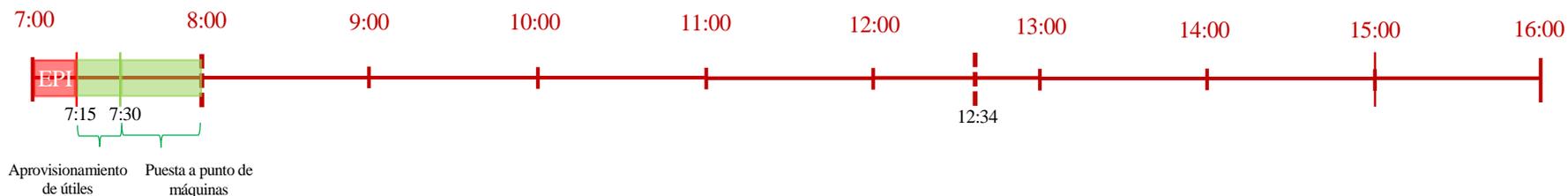
Figura 5. 39. Turnos de trabajo de los operarios y del supervisor en la situación final. Fuente: Elaboración propia.

Operario 1

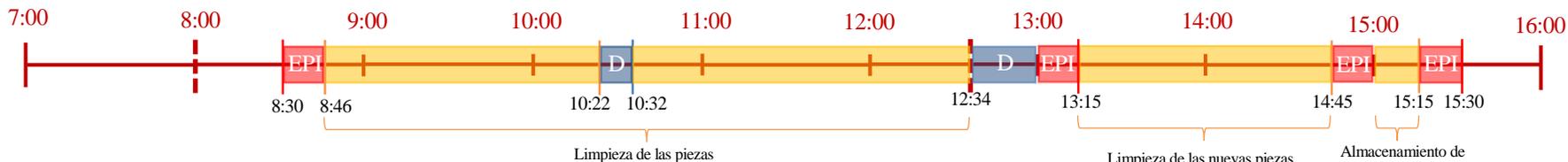
FABRICACIÓN CON OPERACIONES DE SOBREPESAMIENTO



Operario 2



Operario 3



Supervisor

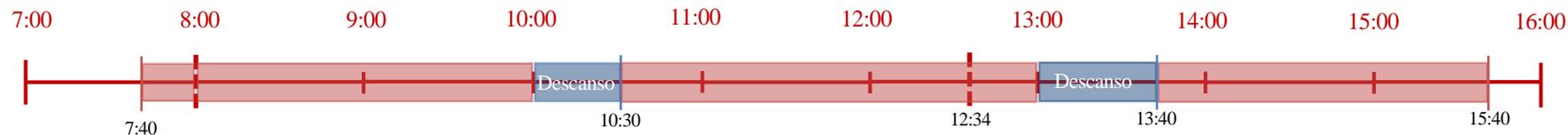


Figura 5. 49. Turnos de trabajo de los operarios y del supervisor en la situación final. Fuente: Elaboración propia.

5.4. Aplicación de las técnicas Lean

En esta sección se van a describir las diferentes herramientas de la filosofía Lean Manufacturing que se han ido empleando a lo largo del capítulo en las diferentes alternativas propuestas con el fin de buscar la solución más idónea a los desperdicios generados en la situación inicial de la planta de fabricación. Asimismo se va a proponer el uso de otras técnicas Lean para complementar las ya usadas y mejorar el sistema productivo de la célula.

5.4.1. Herramientas Lean empleadas en la célula de fabricación.

Inicialmente se parte de un sistema productivo basado en las células de fabricación. Éstas son una de las técnicas Lean que permiten fabricar una determinada variedad de productos generando el menor despilfarro posible. Asimismo, como ya se comentó en el capítulo anterior [subsecciones 4.2.1 y 4.2.5], el layout en forma de U de la célula es el tipo de configuración más adecuado para la reducción de desperdicios, ya que minimiza el espacio ocupado por la célula en la planta y reduce los desplazamientos de los operarios dentro de ella. En el desarrollo de los capítulos 4 y 5, en la explicación de la situación inicial de producción y de las alternativas para su mejora, se han ido empleando algunas de las herramientas Lean que se detallaban en el capítulo 3, aunque no se han ido nombrando como tal. Estas herramientas son: el sistema Pull desde el cliente, la estandarización de las operaciones, SMED, 5S y TPM.

▪ El sistema Pull

La pilar fundamental que sustenta la filosofía Lean en la empresa es el establecimiento de un sistema JIT [subsección 3.2.2] en el que el ritmo de producción lo marca el cliente. Mediante el sistema *justo a tiempo* el producto se fabrica cuando lo demanda el cliente y con las características que desee. Se produce la cantidad exacta en el momento preciso, por lo que es el cliente quien “tira” de la producción.

En la célula de fabricación este pilar está arraigado desde su concepción en la situación inicial descrita en el capítulo anterior. El cliente exige la fabricación y entrega diaria de 40 piezas con las características de diseño expuestas en la subsección 4.2.2. Apenas existe inventario, sólo un stock de seguridad para situaciones en las que no se pueda fabricar durante un largo período de tiempo y las esperas dentro de la célula son las mínimas posibles, tras la modificación e implantación de la alternativa elegida como solución. Las piezas se van fabricando según se va requiriendo en la estación posterior, eliminando costes innecesarios y la generación de despilfarros por acumulación de inventarios.

El mantenimiento del sistema Pull desde el cliente es uno de los principios fundamentales de la filosofía Lean, permite una rápida respuesta de producción ante variaciones de la demanda y proporciona una herramienta primordial para alcanzar la excelencia empresarial.

▪ Estandarización

El establecimiento de estándares [apartado 3.2.3.3] es la base metódica sobre la que se asientan todas las operaciones que tienen lugar en la planta de fabricación y a partir del cual se evalúa el procedimiento de las mismas y su posible desviación de la situación normal de trabajo. Permite identificar errores y solucionarlos rápidamente.

En la célula y en la planta de fabricación en general la estandarización está presente en las siguientes tareas u operaciones:

- Diseño de las piezas a fabricar. Con el diseño asistido por ordenador de los modelos de las piezas se definen todas las operaciones de fresado y rectificado que se llevan a cabo dentro de la célula durante el mecanizado de las mismas. La estandarización de estas operaciones permite su implementación mediante programación de control numérico en las diferentes máquinas.
- Uso correcto de los equipos de protección individuales. Como se ha ido comentando en las secciones anteriores, los operarios deben emplear los EPIs necesarios para cada tarea, con el fin de preservar la seguridad y evitar accidentes durante la realización de las mismas. La forma de colocación de dichos equipos y el modo de mantenerlos limpios para su uso en cualquier momento forman parte de un estándar que se debe seguir y respetar.

- Los desplazamientos de los operarios entre célula y almacenes. Los movimientos de los trabajadores por la planta de fabricación han de seguir el estándar marcado por los diferentes *Diagramas de espagueti* que se han ido detallando para cada situación de fabricación. La desviación del estándar marcado en dichos diagramas puede incurrir en interrupciones o interferencias entre las distintas tareas e incluso en la generación de desperdicios por movimientos o transporte de material innecesarios.

En general, cada tarea tiene definida una forma de actuación y un tiempo de ejecución para su realización. El no cumplimiento de la manera de trabajo estándar puede producir errores, defectos y retrasos en el proceso de fabricación, por lo que es muy importante seguir el método de trabajo marcado. Asimismo es necesario el seguimiento, la revisión y la corrección de dichos estándares para proporcionar en todo momento la mejor forma de realizar las tareas.

- **SMED**

El cambio rápido de herramientas [apartado 3.2.3.5] es una de las características que poseen las máquinas de control numérico de la célula. Cada máquina, excepto la máquina de limpieza, tiene implementadas y programadas las tareas de cambio automático de herramientas. Esta herramienta Lean reduce el tiempo de fabricación y aumenta la productividad en el interior de la célula.

- **Las 5 S**

La fabricación celular y la fabricación Lean requieren de un entorno de trabajo limpio, seguro, organizado y libre de objetos y materiales que puedan entorpecer el correcto funcionamiento del proceso productivo dentro y fuera de la célula. Para mejorar y establecer unas buenas condiciones de trabajo, en la planta de fabricación se emplea la técnica Lean de *las 5 S* [apartado 3.2.3.6] para mantener la organización, el orden, la limpieza, la estandarización y la disciplina en cada uno de los puestos de trabajo.

- **TPM**

El Mantenimiento Productivo Total [apartado 3.2.3.4] pretende coordinar las actividades realizadas por los operarios de producción y por el encargado del mantenimiento de máquinas y equipos, eliminando la antigua concepción de que cada operario se encarga únicamente del manejo de la máquina correspondiente y el personal de mantenimiento, de la limpieza y las reparaciones. Este mantenimiento autónomo promueve la multifuncionalidad y la flexibilidad de los trabajadores en cuanto al trabajo que realizan. De esta forma cada operario prepara, inspecciona, revisa y limpia su puesto de trabajo cada día.

En la célula, tanto la de la situación inicial como la tomada como solución, las operaciones de limpieza se llevan a cabo por los *operarios 2 y 3*, puesto que la duración de las tareas del *operario 1* hace imposible incluir en su turno las tareas de mantenimiento de su puesto de trabajo. Sin embargo, todos los operarios están correctamente formados y cualificados para llevar a cabo el mantenimiento autónomo de los equipos.

5.4.2. Implantación de nuevas herramientas Lean.

En la configuración final de la célula, con duplicación de maquinaria y reubicación de almacenes respecto a la situación inicial, además de las técnicas Lean comentadas en la subsección anterior se desean introducir otras herramientas que ayuden al seguimiento y control de la producción y fomenten la mejora continua en cada una de sus tareas. Para ello se pretenden implantar dos nuevas herramientas: Jidoka o automatización de las operaciones y la gestión visual.

- **Jidoka**

La célula de fabricación se caracteriza por la automatización de las operaciones de fabricación, manipulación de material y cambio de las herramientas de las máquinas. Para el seguimiento y control de todas las tareas, la célula cuenta con el trabajo de un supervisor que se encarga de asegurar el correcto funcionamiento de la misma.

El término Jidoka o automatización [subsección 3.2.2] elimina esta separación entre automatización

y supervisión del trabajo realizado íntegramente por máquinas, defendiendo la práctica de la automatización con un toque humano, es decir, con una ligera supervisión de las tareas. De esta forma se reducen las tareas de supervisión del trabajador encargado de ellas con la introducción de la parada automática de las máquinas ante la detección de un fallo. Para llevar a cabo dichas detecciones el sistema de producción debe contar con sistemas antierrores, Poka-Yoke, y de alerta de incidentes, Andon. Con dichas herramientas Lean se consigue una rápida respuesta del personal ante los problemas que surgen y una importante disminución del tiempo que el supervisor debe permanecer junto a cada máquina controlando el trabajo de la misma.

▪ Gestión visual

La gestión de la célula y de la planta de fabricación en general mediante el empleo de indicadores visuales constituye una de las herramientas básicas para implementar la filosofía Lean Manufacturing en la empresa. En el caso de la célula que se propone finalmente como solución, se desea establecer la gestión de la célula basada en indicadores clave de desempeño o KPI [subsección 3.2.3.9] y en la implantación de un panel SQCDP [subapartado 3.2.3.8.1] que contenga dichos indicadores e informe en todo momento del estado de la célula. El panel informativo y los KPI tienen asociadas importantes funciones dentro del área de trabajo:

- Establecer los objetivos a alcanzar.
- Informar del estado real y actual de cada operación y comparar la situación con los objetivos planificados.
- Hacer posible la toma de decisiones basándose en datos reales.
- Ayuda a identificar rápidamente los problemas, facilitando una respuesta inmediata por parte de los trabajadores.
- Informar al *cliente interno*⁶ de la evolución del trabajo.
- Controlar tanto el estado de la producción como el bienestar de los empleados.

Implantación del panel SQCDP y definición de los KPI

Como ya se comentó en el capítulo 3, en el panel SQCDP se definen los cinco indicadores que dan nombre a dicho panel: seguridad (S), calidad (Q), costes (C), entregas (D) y personas (P). Estos indicadores se sitúan en el panel por columnas, en general diferenciadas por colores, donde los operarios pueden rellenarlos con la información correspondiente, promoviendo de esta forma una participación activa por parte de los mismos. A continuación se detallan las características de estos cinco indicadores principales y se proponen distintos KPI para cada una de las hojas que componen el panel. A modo de recordatorio se muestra en la figura 5.41 la estructura del panel SQCDP.

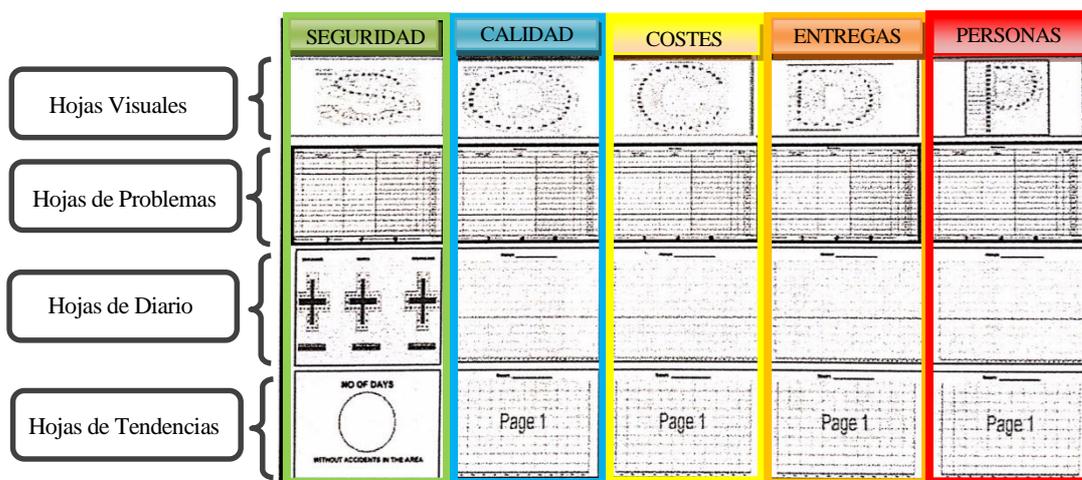


Figura 5. 41. Panel informativo SQCDP. Fuente: Curso Lean en la fabricación aeronáutica.

⁶ Estación de trabajo, empleado o departamento dentro de la empresa que toma el producto de un proceso anterior para realizar sus operaciones sobre el mismo para luego pasarlo a la siguiente estación de trabajo o cliente interno.

INDICADOR DE SEGURIDAD

Este indicador tiene como objetivo informar de cualquier tipo de incidencia que pueda producirse y pueda repercutir directamente en la seguridad del área de trabajo. En la *hoja visual* se representa la letra S, que da nombre al indicador, dividida en 31 casillas correspondientes a los 31 días de un mes cualquiera. De esta forma, si se produce alguna incidencia se colorea de rojo la casilla correspondiente al día y al turno de trabajo. Si no se producen incidencias, las casillas aparecen coloreadas de verde. El departamento responsable de este indicador, por ejemplo, el Departamento de Seguridad, Salud y Medio Ambiente, debe conocer diariamente el estado de este indicador y proponer las acciones correctoras que crea oportunas para que todos los empleados tengan constancia de ellas. En la *hoja de diario* se representan, mediante cruces, diferentes KPI asociados al control de la seguridad en el área de trabajo. Entre ellos se encuentran: número de incidencias leves, número de accidentes sin baja y con baja médica y uso de los EPIs, entre otros. Por último, en la *hoja de tendencias* se muestra la acumulación de los indicadores anteriores durante un período de tiempo concreto, por ejemplo, un mes. De esta forma se tiene una visualización clara de la tendencia de los indicadores con el paso de los días. Como indicador de seguridad, el KPI más importante que se suele indicar en la hoja de tendencias es un contador de días sin accidentes.

INDICADOR DE SEGURIDAD

Informa de los defectos o incidencias que provocan la ausencia de calidad en las operaciones realizadas o en el propio producto. En la *hoja visual*, en la que aparece una Q haciendo referencia a la calidad (quality, en inglés), se colorean en rojo las casillas correspondientes a los días en los que se producen piezas defectuosas y, por lo tanto, re-procesos por falta de calidad en el producto, y en verde, aquellos días y turnos donde la fabricación dentro de la célula se lleva a cabo de forma ideal. Además de los defectos durante la fabricación de las piezas, el indicador de calidad informa de quejas del cliente y muestra las hojas de no conformidad. En la *hoja de problemas*, el Departamento de Calidad analiza las causas de las incidencias y propone las soluciones o las acciones necesarias para eliminarlas. Los KPI que generalmente se muestran en la hoja de diario son contadores de quejas del cliente, tanto interno como externo, y no conformidades expuestas en auditorías. Dichas quejas suelen representarse mediante gráficas en las que se van anotando los días en los que se producen dichas quejas. La *hoja de tendencias* muestra igualmente la evolución de la aparición de no conformidades, quejas o defectos a lo largo de un período de tiempo, por ejemplo, un año.

INDICADOR DE COSTES

Posee un carácter más general que el resto de indicadores ya que engloba todos los costes asociados a la fabricación de las piezas y recoge todas las incidencias que puedan repercutir en el aumento de dichos costes: falta de material, re-procesos, averías en las máquinas, etc. Al igual que los indicadores anteriores, la *hoja visual* contiene la letra que designa el indicador, en este caso la C, dividida en 31 casillas. Si los incidentes que se observan durante el turno de trabajo no conllevan unos costes que excedan un límite fijado, la casilla se colorea en verde. Si por el contrario, se producen situaciones que elevan el coste final de producción por encima de dicho límite se coloreará en rojo la casilla correspondiente. En estas últimas el Departamento de Costes propone las acciones correctoras oportunas, las cuales quedan reflejadas en la *hoja de problemas*. En la *hoja de diario* quedan reflejados los KPI que se quieren medir referentes a los costes de producción: coste de unidad producida, coste de unidad almacenada, coste por pieza desechada, etc. Estos KPI suelen representarse en gráficas junto al objetivo a conseguir, para tener presente en cada momento la desviación respecto al ideal. En la *hoja de tendencias* se muestra el desarrollo de los costes de diferentes meses, para conocer su evolución en el tiempo.

INDICADOR DE ENTREGAS

Refleja la cantidad planificada de producto que se debe entregar en cada momento y la cantidad real que se entrega. Proporciona una buena forma de visualizar el avance de la producción de la célula y sirve como herramienta de seguimiento, control y organización del trabajo, adaptando la capacidad de producción a la demanda del cliente. Las casillas de la letra D (delivery, en inglés) representada en la *hoja visual* se colorean en rojo en caso de producirse retrasos en la entrega de las 40 piezas diarias, y en verde en caso contrario. En los casos que los KPI sean de color rojo el Departamento de Logística debe indicar las causas del retraso en la *hoja de problemas* y reajustar el tiempo de producción para

que el producto pueda entregarse lo antes posible, dentro de un plazo de tiempo razonable. En la *hoja de diario* se pueden anotar los siguientes KPI: número de entregas realizadas a tiempo, órdenes de transporte de unidades a entregar, número de unidades en retraso, etc. Se suelen representar en gráficas cuyo eje horizontal refleja los días del mes y el vertical, las unidades o productos entregados. En la *hoja de tendencia* se muestra la evolución de cada mes durante un año, indicando en color verde si se ha alcanzado el número fijado de piezas entregadas, o en rojo, si los retrasos han imposibilitado la entrega a tiempo de la cantidad exigida de productos.

INDICADOR DE PERSONAS

Muestra la capacidad de la empresa para realizar el trabajo deseado, es decir, la mano de obra de la cual dispone durante un turno de trabajo. El indicador de personas refleja las faltas de personal por absentismo, puntualidad y otras causas que puedan perjudicar a la carga de trabajo, retrasando así la entrega del producto. Las casillas de la P dibujada en la *hoja visual* se colorean en rojo o en verde, dependiendo de si se producen o no dichas faltas. El Departamento de Recursos Humanos controla dichos indicadores y realiza seguimientos periódicos y anota la evolución y las causas de las faltas de personal en la hoja de problemas. En la *hoja de diario*, los KPI más importantes que se muestran son los indicadores de absentismo y puntualidad de los trabajadores. Se colorea de rojo si es un retraso, una falta injustificada, una enfermedad común o un accidente laboral. En la *hoja de tendencia* se muestra la evolución de las faltas de los trabajadores durante un período concreto.

Diseño de los KPI

En el diseño de los KPI debe incluirse toda la información necesaria para que éstos queden bien definidos y cumplan correctamente con su función: la de informar y registrar los datos de un cierto parámetro medible. Los aspectos a definir de cada uno de ellos son los recogidos en la subsección 3.2.3.9. A continuación se van a diseñar algunos de los KPI necesarios para la gestión de la célula y se va a proponer un ejemplo del panel SQCDP en el mes de mayo.

| INDICADORES DE SEGURIDAD | | | |
|------------------------------|---|--|--|
| KPI | Accidentes sin baja | Accidentes con baja | Uso de EPIs |
| Definición | Nº de accidentes producidos durante el período medido que no conllevan un baja médica | Nº de accidentes producidos durante el período medido que conllevan un baja médica | Empleo de los equipos de protección individuales en las tareas que lo requieran |
| Ratio | \sum Accidentes sin baja | \sum Accidentes con baja | $\frac{\text{Veces empleadas} \cdot 100}{\text{Total de veces que deben emplearse}}$ |
| Unidades | Accidentes sin baja | Accidentes con baja | - |
| Periodicidad | Diario | | |
| Proceso | Todas las tareas | | |
| Responsable | Departamento de Seguridad, Salud y Medio Ambiente | | |
| Objetivo | 0 | 0 | 100 % |
| Expectativa | 0 | 0 | 100 % |
| Límites legales ⁷ | - | - | - |
| Límite de aceptabilidad | 0 | 0 | 100 % |
| Propósito del indicador | Controlar el número de accidentes sin baja y encontrar sus causas | Controlar el número de accidentes con baja y encontrar sus causas | Asegurar la protección y la seguridad de los empleados |
| Grupos de interés | Directivos y empleados | | |
| Soporte | Papel | | |

Tabla 5. 33. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Seguridad del panel SQCDP. Fuente: Elaboración propia.

⁷ Estos límites impuestos por el Gobierno afectan a las tareas relacionadas con la contaminación del medio ambiente o la exposición de los trabajadores a ambientes nocivos para su salud.

| INDICADORES DE CALIDAD | | |
|-------------------------|--|---|
| KPI | Número de piezas defectuosas | Fiabilidad |
| Definición | Recuento de piezas que no pasan satisfactoriamente el proceso de verificación | Porcentaje de tiempo libre de fallos y defectos |
| Ratio | \sum Piezas defectuosas | $\frac{\text{Tiempo en el que no se producen fallos}}{\text{Horas de funcionamiento}} \cdot 100$ |
| Unidades | Piezas defectuosas | - |
| Periodicidad | Por turno | |
| Proceso | Fabricación en la célula | |
| Responsable | Departamento de Calidad | |
| Objetivo | 0 | 100 % |
| Expectativa | 2 | 98 % |
| Límites legales | - | - |
| Límite de aceptabilidad | 4 | 95 % |
| Propósito del indicador | Contabilizar el número de piezas defectuosas y el proceso en el que se producen los defectos | Asegurar que las máquinas se encuentran en perfecto estado para lograr el objetivo de cero defectos |
| Grupos de interés | Directivos y supervisor de planta | |
| Soporte | Digital | |

Tabla 5. 34. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Calidad del panel SQCDP. Fuente: Elaboración Propia.

| INDICADORES DE COSTES | | |
|-------------------------|---|---|
| KPI | Coste de unidad producida | Coste de unidad almacenada |
| Definición | Costes asociados a la producción de una pieza | Costes asociados al almacenamiento de una pieza |
| Ratio | $\sum C_{\text{mano de obra}} + C_{\text{tocho}} + C_{\text{transportes}} + \dots + C_{\text{energía}} + C_{\text{desgaste de herramientas}}$ | $\sum C_{\text{mano de obra}} + C_{\text{transportes}} + \dots + C_{\text{mantenimiento de stock}}$ |
| Unidades | Euros | |
| Periodicidad | Semanal | |
| Proceso | Fabricación en la célula | Almacenamiento |
| Responsable | Departamento de Costes | |
| Objetivo | $C_{\text{unidad producida}}$ | $C_{\text{unidad almacenada}}$ |
| Expectativa | $1.01 \cdot C_{\text{unidad producida}}$ | $1.01 \cdot C_{\text{unidad almacenada}}$ |
| Límites legales | - | - |
| Límite de aceptabilidad | $1.1 \cdot C_{\text{unidad producida}}$ | $1.1 \cdot C_{\text{unidad almacenada}}$ |
| Propósito del indicador | Controlar los costes asociados a la producción de las piezas, identificando las causas que hacen que se incrementen | Controlar los costes asociados al almacenamiento de las piezas y la cantidad de stock disponible. |
| Grupos de interés | Directivos y responsables de costes | |
| Soporte | Digital | |

Tabla 5. 35. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Costes del panel SQCDP. Fuente: Elaboración Propia.

| INDICADORES DE ENTREGAS | | |
|-------------------------|---|--|
| KPI | Entregas a tiempo | Órdenes de transporte |
| Definición | Porcentaje de lotes de 40 piezas que se entregan sin retraso | Porcentaje de órdenes de transporte de material por la planta de fabricación que se ejecutan a tiempo |
| Ratio | $\frac{\text{Lotes entregados a tiempo}}{\text{Total de lotes a entregar}} \cdot 100$ | $\frac{\text{N}^\circ \text{ de órdenes ejecutadas sin retraso}}{\text{N}^\circ \text{ total de órdenes}} \cdot 100$ |
| Unidades | - | - |
| Periodicidad | Diario | |
| Proceso | Entrega del producto | Almacenamiento y transporte de material |
| Responsable | Departamento de Logística | |
| Objetivo | 100 % | 100 % |
| Expectativa | 100 % | 99 % |
| Límites legales | - | - |
| Límite de aceptabilidad | 90 % | 98 % |
| Propósito del indicador | Controlar la capacidad de producción de la célula y su <i>Lead Time</i> | Asegurar que el material esté disponible a tiempo en cada momento |
| Grupos de interés | Supervisor de planta | |
| Soporte | Digital | |

Tabla 5. 36. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Entregas del panel SQCDP. Fuente: Elaboración Propia.

| INDICADORES DE ENTREGAS | | |
|-------------------------|--|---|
| KPI | Absentismo | Puntualidad |
| Definición | Porcentaje de personal que asiste al trabajo | Porcentaje de personal que comienza el trabajo a la hora establecida |
| Ratio | $\frac{\text{Personal que acude al trabajo}}{\text{Total de personal en plantilla}} \cdot 100$ | $\frac{\text{Personal que llega puntual} \cdot 100}{\text{Total de personal que acude al trabajo}}$ |
| Unidades | Faltas laborales | Retrasos |
| Periodicidad | Por turno | |
| Proceso | Todas las tareas | |
| Responsable | Departamento de Recursos Humanos | |
| Objetivo | 100 % | 100 % |
| Expectativa | 99 % | 99 % |
| Límites legales | - | - |
| Límite de aceptabilidad | 95 % | 95 % |
| Propósito del indicador | Controlar el número de empleados que no acuden al trabajo en un turno | Controlar las faltas de puntualidad para cuadrar los turnos y evitar retrasos en la producción |
| Grupos de interés | Empleados | |
| Soporte | Papel | |

Tabla 5. 36. Diseño de los KPI pertenecientes al indicador de Entregas del panel SQCDP. Fuente: Elaboración Propia.

| Mes | Día | Indicador de Seguridad | | | Indicador de Calidad | | Indicador de Costes | | Indicador de Entregas | | Indicador de Personas | |
|------|-----|------------------------|---------------------|-------------|----------------------|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | | Accidentes sin baja | Accidentes con baja | Uso de EPIs | Piezas defectuosas | Fiabilidad | Unidad producida | Unidad almacenada | Entregas a tiempo | Órdenes de transporte | Absentismo | Puntualidad |
| Mayo | 1 | Domingo | | | | | | | | | | |
| | 2 | 0 | 0 | 100 % | 1 | 99 % | 1.01 C _{up} | 1.01 C _{ua} | 100 % | 100 % | 90 % | 100 % |
| | 3 | 0 | 0 | 100 % | 1 | 98 % | 1.01 C _{up} | 1.01 C _{ua} | 100 % | 99 % | 99 % | 100 % |
| | 4 | 0 | 0 | 100 % | 2 | 98 % | 1.02 C _{up} | 1.03 C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 5 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 6 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 7 | Sábado | | | | | | | | | | |
| | 8 | Domingo | | | | | | | | | | |
| | 9 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 10 | 0 | 0 | 100 % | 1 | 99 % | 1.01 C _{up} | 1.01 C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 99 % |
| | 11 | 0 | 0 | 100 % | 1 | 99 % | 1.01 C _{up} | 1.01 C _{ua} | 100 % | 98 % | 100 % | 100 % |
| | 12 | 0 | 0 | 100 % | 2 | 99 % | 1.03 C _{up} | 1.03 C _{ua} | 100 % | 99 % | 100 % | 100 % |
| | 13 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 99 % | 100 % | 100 % |
| | 14 | Sábado | | | | | | | | | | |
| | 15 | Domingo | | | | | | | | | | |
| | 16 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 99 % | 99 % |
| | 17 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 99 % |
| | 18 | 0 | 0 | 100 % | 2 | 99 % | 1.01 C _{up} | 1.03 C _{ua} | 100 % | 99 % | 100 % | 100 % |
| | 19 | 0 | 0 | 100 % | 2 | 98 % | 1.02 C _{up} | 1.03 C _{ua} | 100 % | 99 % | 100 % | 100 % |
| | 20 | 0 | 0 | 100 % | 3 | 97 % | 1.05 C _{up} | 1.05 C _{ua} | 100 % | 97 % | 100 % | 100 % |
| | 21 | Sábado | | | | | | | | | | |
| | 22 | Domingo | | | | | | | | | | |
| | 23 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 24 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 99 % | 100 % | 100 % |
| | 25 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 26 | 0 | 0 | 100 % | 1 | 99 % | 1.01 C _{up} | 1.01 C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 27 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| | 28 | Sábado | | | | | | | | | | |
| | 29 | Domingo | | | | | | | | | | |
| | 30 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 97% | 100 % | 100 % |
| | 31 | 0 | 0 | 100 % | 0 | 100 % | C _{up} | C _{ua} | 100 % | 98% | 100 % | 100 % |

Tabla 5. 38. Ejemplos de KPI para cada indicador del panel SQCDP sobre la producción de la célula durante el mes de mayo. Fuente: Elaboración propia.

Utilización de la información del panel SQCDP

Para asegurar el buen funcionamiento de la fábrica no basta con anotar los datos que se desean medir en el panel, sino que con cierta frecuencia deben realizarse reuniones interdepartamentales para evaluar la situación actual de la planta y del proceso productivo, así como reuniones entre los directivos y los responsables de planta, donde se propongan las soluciones a adoptar. De esta manera, por ejemplo, las reuniones de departamento tienen lugar al principio y al final de cada turno, en las que se revisa la información del turno anterior, se realiza un control de asistencia y un resumen del turno una vez finalizado, haciendo constancia de las incidencias que puedan haber ocurrido. Por su parte, en las reuniones de dirección y jefes de producción se proponen las medidas para lograr los objetivos planificados.

Dentro de la jerarquía de la empresa el flujo de datos debe ser bidireccional: ascendente, el flujo de información, desde los operarios hasta el responsable de planta y el director, quienes controlan el estado de la producción; descendente, el flujo de órdenes propuestas por la dirección y el responsable o jefe de planta y que deben llevar a cabo los operarios.

Todas estas reuniones adquieren un carácter interdepartamental gracias a la introducción de una herramienta llamada Hoja de Confirmación de Proceso, mediante la cual se garantiza el cumplimiento de las medidas tomadas en las reuniones para solucionar los problemas que alejan la producción de los objetivos marcados. Es una herramienta de control y organización de la producción.

5.4.3. Cambios a largo plazo.

Dentro de las herramientas Lean también se encuentran todas aquellas que fomenten la mejora continua del sistema productivo y contribuyan a la reducción de desperdicios generados dentro y fuera de la célula. A lo largo del capítulo se han contabilizado y reducido los desperdicios que se generan por el tiempo de espera que las piezas permanecen sin ser procesadas dentro de la célula y por los desplazamientos y movimientos de personal por la planta de fabricación. Sin embargo, el principal despilfarro que se genera en la planta de fabricación y del cual aún no se ha propuesto ninguna solución son los desperdicios debido a los defectos causados en las piezas durante la fabricación, lo cual incurre en gastos, tiempo extra de fabricación y en operaciones de sobreprocesamiento.

En todas las situaciones estudiadas acerca de la configuración de la célula el proceso de verificación de las piezas se realiza una vez acabado el mecanizado de las mismas. Esta práctica conlleva a que si se produce un fallo en el fresado de una de las piezas, éste no se detecta hasta que la pieza no pase por la máquina de medición de coordenadas, lo que supone fresar y rectificar una pieza que luego se va a desechar por incumplimiento en las especificaciones de diseño en cuanto al fresado. Por ello se propone la automatización del proceso de verificación.

▪ **Automatización del proceso de verificación**

En la célula, el control de calidad de las piezas se realiza tras el mecanizado de las mismas, lo que se conoce como inspección posterior al proceso, y, si se aprueba, dichas piezas se someten al proceso de limpieza, desechando las que no pasan la inspección de calidad.

Sin embargo, con la automatización del proceso de verificación o inspección automatizada se desea eliminar la inspección posterior al mecanizado de las piezas, empleando varios sistemas con múltiples sensores que supervisan los parámetros que se desean medir y controlar durante la fabricación. Los sensores que se emplean pueden ser mecánicos, eléctricos, magnéticos o térmicos, táctiles o no táctiles, y pueden funcionar basándose en los principios de las galgas extensiométricas y calibradores de inductancia, capacitancia, ultrasonido, acústica, neumática, radiación infrarroja, óptica, laser o electrónicos. Se conectan con microprocesadores y con un computador para visualizar gráficamente los datos medidos. Con el uso de sensores y diversas sondas pueden medirse tanto las características del producto que se está fabricando (dimensiones, rugosidad superficial, presencia de defectos internos y externos) como de la máquina que lo fabrica (fuerza, potencia, vibración o desgaste de la herramienta). Usando estas mediciones, el proceso se va corrigiendo continuamente de forma automática, desechando en cada momento las piezas sobre las que se realiza alguna operación errónea y evitando que dichas piezas continúen con el proceso de fabricación.

La inspección automatizada es ampliamente utilizada en los FMS, debido a su flexibilidad ante los cambios en el diseño del producto. Además aumenta la productividad, reduce el tiempo de fabricación y elimina o minimiza los desperdicios causados por los defectos en las piezas y por el sobreprocesamiento, aumentando la calidad del producto.

Por todo ello, la automatización de la verificación del mecanizado de las piezas es una buena solución a la reducción de la producción de piezas defectuosas durante los turnos de trabajo, con lo que disminuirían los despilfarros por sobreprocesamiento y por defectos durante las operaciones de fresado y mecanizado. Sin embargo, esta propuesta supone un alto coste de inversión en las nuevas máquinas que deben integrar las funciones de inspección automatizada, además de la instalación de los sensores y sondas necesarios y de la programación de la información que se desea medir, que requiere de formación especializada de los operarios. Por lo tanto, esta automatización se propone como una solución a largo plazo a los desperdicios por defectos generados en la planta. Como solución a corto plazo se realizan calibraciones y controles predictivos y preventivos a las máquinas, robots y herramientas con la frecuencia fijada en el plan de mantenimiento del TPM.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo final se plantea el problema al cual se da solución en el desarrollo del documento, sintetizando los objetivos a alcanzar, las medidas y métodos empleados y los resultados obtenidos. Asimismo se analiza la solución final comparándola con el problema inicial y se exponen las conclusiones derivadas de dicho análisis.

6.1. Resumen del problema y su solución

El objetivo de este estudio era la determinación y propuesta de mejora del sistema productivo de una célula autónoma de fabricación de piezas inferiores a 500 mm formada por cinco máquinas, algunas de ellas, de control numérico. Únicamente con esta información y con el tipo y capacidad productiva de las máquinas, además del dato de la existencia de varios almacenes con los que aprovisionar la célula, se inició la concepción de una célula de trabajo y su plan de producción, a partir de la cual se desarrollarían todos los cambios y modificaciones pertinentes para la mejora de su sistema productivo y para la reducción de los desperdicios generados.

De esta forma y por los motivos expuestos en el capítulo 4, inicialmente la célula autónoma de fabricación es flexible y su finalidad es la fabricación diaria de 40 piezas pequeñas de aluminio correspondientes a dos tipos diferentes de piezas que ensamblan la sección 25 del fuselaje del avión C-295 de Airbus Group. Sus máquinas se disponen en un layout en forma de U y se ubica en una amplia planta de producción junto a los almacenes.

La producción de las 40 piezas diarias, 20 de cada tipo, se realiza en dos turnos de 8 horas aproximadamente, durante 5 días a la semana. Para ello, en cada turno son necesarios tres operarios y un supervisor que se encarga del control de las operaciones. Dentro de la producción de las piezas se distinguen dos situaciones: *fabricación ideal*, en la que no se producen incidencias de ningún tipo y las 20 piezas se fabrican de acuerdo al plan de producción y *fabricación con operaciones de sobreprocesamiento*, en la que es necesario volver a producir algunas piezas que se han fabricado con algún tipo de defecto y que, por tanto, hay que desechar.

La fabricación en el interior de la célula se lleva a cabo por dos fresadoras, una rectificadora, una máquina de medición de coordenadas para verificar los atributos de diseño y calidad del producto, una máquina de limpieza, dos pequeños robots móviles para la manipulación y colocación de las piezas y tochos en las máquinas, que se desplazan sobre un carril guía entre las distintas máquinas, y una cinta transportadora de material en forma de U que recorre la célula y sobre la que se desplazan las piezas. Además la célula cuenta con cinco estantes o almacenes intermedios donde se colocan los útiles, los tochos y las piezas durante la fabricación.

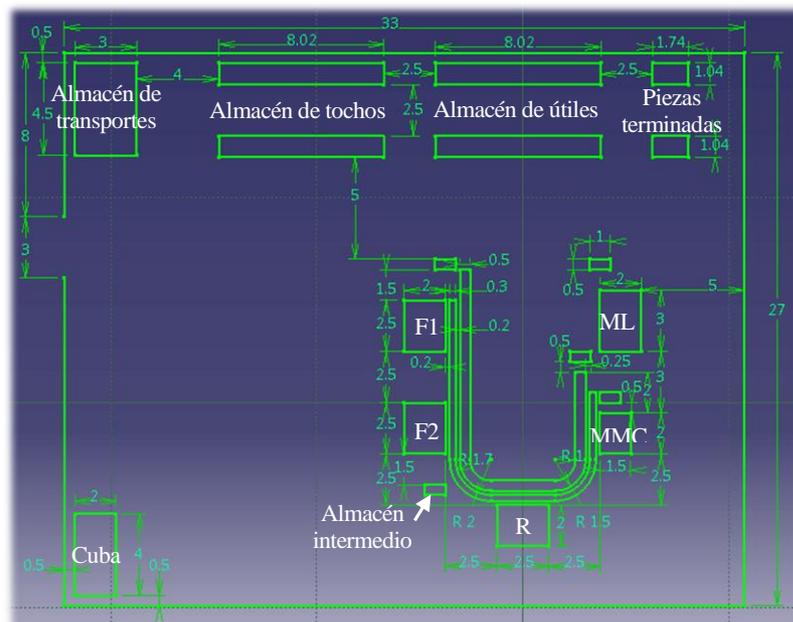
El tiempo de fabricación ideal en el interior de la célula es de aproximadamente 6 horas y 10 minutos. Este tiempo se ve incrementado cuando se producen piezas defectuosas y éstas deben volver a fabricarse. Por tanto, el tiempo total de fabricación variará dependiendo del número y tipo de piezas que se necesiten fabricar de nuevo.

El número máximo de piezas defectuosas que se suele producir durante un turno de trabajo es 4, por lo que el tiempo máximo de fabricación es de 8 horas y 20 minutos aproximadamente, que es el tiempo desde que se inicia la fabricación, a las 8:00, hasta que el operario encargado de la limpieza de las piezas concluya la limpieza de las nuevas piezas fabricadas que mayor tiempo de fabricación tengan asociado (que en este caso son cuatro piezas de tipo A), a las 16:20, aproximadamente.

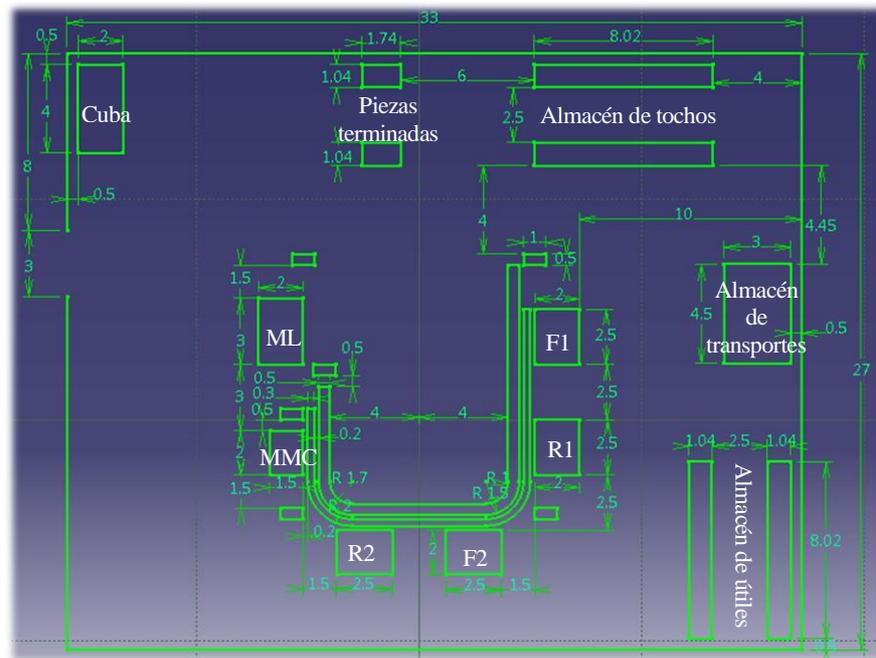
Debido a la generación de despilfarros por esperas de las piezas sin ser procesadas en la célula durante la fabricación, por movimientos y transporte de material, por defectos en el producto y por sobreprocesamiento debido a dichos defectos, se deduce la necesidad de buscar diferentes alternativas desde la metodología de trabajo Lean a la configuración de la planta o de la célula para reducir dichos desperdicios. Por ello, se proponen las siguientes alternativas:

- Duplicación de maquinaria. Con la adquisición de una nueva rectificadora y un nuevo robot móvil se agiliza el proceso de rectificado y se consigue reducir el cuello de botella producido a la entrada de la rectificadora en la célula de la situación inicial.
- Layout centrado en robot. En esta configuración se cambia completamente el layout de la célula, eliminando la cinta transportadora, los robots móviles y su carril guía y empleando dos grandes robots cuyos brazos articulados realizan las operaciones de alimentación de las máquinas y desplazamientos de las piezas en el interior de la célula. El objetivo es la reducción del tiempo de fabricación y las esperas, al mismo tiempo que se proporciona flexibilidad al sistema.
- Cambio de distribución de la planta de fabricación. Con la reubicación de los almacenes por la planta, se reducen los desplazamientos de los operarios y disminuye el tiempo empleado en el transporte de material.

Cada alternativa proporciona unos beneficios concretos para reducir los desperdicios observados en la célula de la situación inicial y, en ocasiones, algunas desventajas que incrementan la generación de dichos desperdicios o de otros nuevos. Tras comparar los pros y los contras de cada propuesta con la situación inicial, se decide adoptar como solución una combinación de la primera y tercera alternativas. De esta forma se duplica la maquinaria de la célula, de la que se sigue respetando la forma en U de la situación inicial, al mismo tiempo que se reubican los almacenes externos a la misma respecto a la planta de fabricación. En la figura 6.1 se muestran las distribuciones en planta de la situación inicial y de la situación final, tras realizar los cambios sugeridos.



a)



b)

Figura 6.1. Layout general de la planta de fabricación con sus principales medidas (en metros) a) en la situación inicial y b) en la situación final. F1, fresadora 1; F2, fresadora 2; R1, rectificadora 1; R2, rectificadora 2; MMC, máquina de medición de coordenadas; ML, máquina de limpieza Fuente: Elaboración propia.

Con la duplicación de maquinaria, el tiempo de fabricación ideal, cuando no se producen piezas defectuosas, es de 4 horas y 34 minutos. La duración máxima de la fabricación cuando se requieren re-procesos es de 7 horas y 50 minutos, que es el tiempo desde que se inicia la fabricación, a las 8:00, hasta que concluye el proceso de limpieza de cuatro piezas de tipo A, ya que esta combinación es la que tarda mayor tiempo en fabricarse. Por otra parte, con la modificación del emplazamiento de los almacenes respecto de la célula, se consiguen acortar los desplazamientos de los operarios, lo que conlleva una directa reducción de la duración de las tareas externas a la célula.

| Características de la célula | Situación inicial | | Situación final | |
|--|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | Ideal | Con re-procesos | Ideal | Con re-procesos |
| Tipo de layout de la célula | En forma de U | | En forma de U | |
| Número de máquinas | 5 | | 6 | |
| Número de robots | 2 | | 3 | |
| Número de estantes intermedios | 5 | | 6 | |
| Duración de las tareas | | | | |
| Recepción de tochos | 1 hora | | 1 hora 15 minutos | |
| Aprovisionamiento de la célula | Tochos | 20 minutos | 15 minutos | |
| | Útiles | 20 minutos | 15 minutos | |
| Preparación y puesta a punto de las máquinas | 40 minutos | | 30 minutos | |
| Proceso de fabricación (20 piezas) | 6 horas y 10 minutos (22154 s) | | 4 horas 34 minutos (16440 s) | |
| Recuento de piezas defectuosas | - | 10 minutos | - | 10 minutos |
| Fabricación de las nuevas piezas | - | 2 horas 19 minutos (como máximo) | - | 2 horas 19 minutos (como máximo) |
| Almacenamiento de piezas terminadas | 20 minutos | | 15 minutos | |
| Devolución de tochos no usados al almacén | 15 minutos | | 10 minutos | |
| Almacenamiento de piezas defectuosas | - | 15 minutos | - | 10 minutos |
| Limpieza de la célula | 40 minutos | - | 40 minutos | - |
| Limpieza de las máquinas | 1 hora | - | 1 hora | - |
| Vaciado de la cuba de desechos | 20 minutos | | 15 minutos | |

Tabla 6. 1. Comparativa de las características relevantes de la célula en las situaciones inicial y final.

Fuente: Elaboración propia.

Para concluir el análisis de la solución y teniendo en cuenta la reducción de 1 hora y 35 min que se consigue en el proceso de fabricación de las piezas, resulta conveniente calcular el número de piezas adicionales sin defectos que se podrían fabricar en la célula de la situación final, durante las 6 horas y 10 minutos que tardan en fabricarse 20 piezas en la situación inicial.

Haciendo uso de la tabla 5.3, en la que se mostraba la periodicidad de salida de las piezas de cada máquina, se tiene que cada 1920 segundos sale un lote de tres piezas de la máquina de limpieza. Por otra parte, según las tablas 5.1 y 5.2 se sabe que el penúltimo lote de piezas (se toma éste y no el último que está formado únicamente por dos piezas) acaba su fabricación en el segundo 15160 desde que se inicia el proceso, y que hasta ese momento se han producido correctamente 18 piezas. Por tanto, cada vez que transcurran 1920 segundos a partir del instante 15160, se obtienen 3 nuevas piezas fabricadas. De esta forma puede calcularse el número de piezas adicionales que pueden fabricarse desde el segundo 15160 hasta el 22154, instante en el que finaliza la fabricación de 20 piezas en la situación inicial, de la siguiente forma:

1. Restando las cantidades 22154 y 15160 se obtienen 6994 segundos que es el tiempo disponible para fabricar piezas a partir de las primeras 18 piezas fabricadas.
2. Dividiendo dicho resultado por los 1920 segundos necesarios para que un lote de tres piezas finalice su fabricación, se obtienen 3.64 lotes, es decir 3 lotes de tres piezas y un cuarto lote de una o dos piezas.

Este resultado puede concretarse más aun sabiendo, mediante la tabla 5.1, que si un lote está formado por dos piezas, como es el caso de las piezas A9 y A10, éste finaliza su fabricación 1280 segundos después del lote anterior. Por esta razón, si se suma dicha cantidad al tiempo necesario para fabricar los 3 lotes adicionales, $15160+1920\cdot 3+1280$, se obtienen 22200 segundos, tiempo superior a los 22179 segundos disponibles, por lo que el cuarto lote está formado por una sola pieza.

Por todo ello, puede concluirse que mientras en la célula de la situación inicial se fabrican 20 piezas en 22154 segundos, en el mismo tiempo se producen 28 piezas en la célula propuesta como solución, siempre que no se produzcan piezas defectuosas en ambas situaciones.

6.2. Equilibrado de la línea

Una vez obtenida la solución de la configuración más idónea para la reducción de los desperdicios mediante la aplicación de las técnicas y herramientas de la metodología Lean es importante realizar un *balanceo o equilibrado de la línea* de producción que permita obtener un mayor control de la fabricación y de los tiempos de trabajo de las diferentes tareas. El objetivo del balanceo es establecer un equilibrio entre la capacidad de producción y la demanda a satisfacer mediante la agrupación de tareas en estaciones que trabajan al mismo ritmo de producción. Establecer una línea de producción balanceada requiere de una rigurosa recopilación de datos, así como de la aplicación de métodos matemáticos que permitan el estudio de la nivelación de la producción.

El problema de equilibrado o ALBP (Assembly Line Balancing Problem) rara vez tiene solución exacta y práctica, por lo que para su resolución se suelen emplear métodos heurísticos que proporcionan una buena solución aproximada. En el Anexo B se detalla el método empleado para el cálculo del equilibrado de la línea de producción: el método heurístico *de Helgeson & Birnie*. Este método se basa en asignación de pesos a cada una de las tareas para establecer un orden de prioridad que permita agruparlas en estaciones. El peso de cada tarea será la suma de su tiempo de operación más el de todas las tareas sucesoras.

En la tabla 6.2 se muestra la relación de tareas que intervienen en el balanceo y el tiempo que cada una de ellas requiere para ser realizada.

| Tareas | Nº | Tareas predecesora | Tiempo de ejecución |
|------------------------------------|----|--------------------|---------------------|
| Aprovisionamiento tochos | 1 | - | 15 min (900 s) |
| Aprovisionamiento útiles | 2 | - | 15 min (900 s) |
| Puesta a punto máquinas | 3 | 1,2 | 30 min (1800 s) |
| Entrada cinta-robot 1 | 4 | 3 | 28 s |
| Robot 1-fresadora 1 | 5 | 4 | 20 s |
| Fresado (piezas tipo A) | 6 | 5 | 20 min (1200 s) |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | 7 | 6 | 20 s |
| Cinta-robot 1 | 8 | 7 | 50 s |
| Robot 1-rectificadora 1 | 9 | 8 | 20 s |
| Rectificado (piezas A) | 10 | 9 | 15 min (900 s) |
| Rectificadora 1-robot 1-cinta | 11 | 10 | 20 s |
| Cinta-robot 3 | 12 | 11 | 128 s |
| Entrada cinta-robot 2 | 13 | 3 | 118 s |
| Robot 2-fresadora 2 | 14 | 13 | 20 s |
| Fresado piezas tipo B | 15 | 14 | 15 min (900 s) |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | 16 | 15 | 20 s |
| Cinta-robot 2 | 17 | 16 | 49 s |
| Robot 2-rectificadora 2 | 18 | 17 | 20 s |
| Rectificado (piezas B) | 19 | 18 | 15 min (900 s) |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | 20 | 19 | 20 s |
| Cinta-robot 3 | 21 | 20 | 38 s |
| Robot 3-MMC | 22 | 12, 21 | 20 s |
| Verificación | 23 | 22 | 10 min (600 s) |
| MMC-robot 3-cinta | 24 | 23 | 20 s |
| Cinta-operario | 25 | 24 | 30 s |
| Estante-máquina de limpieza | 26 | 25 | 20 s |
| Limpieza de piezas | 27 | 26 | 20 min (1200 s) |
| Máquina de limpieza-secado-estante | 28 | 27 | 5 min (300 s) |
| Almacenamiento piezas terminadas | 29 | 28 | 15 min (900 s) |
| Devolución de tochos no usados | 30 | 29 | 10 min (600 s) |
| Limpieza de la célula | 31 | 28 | 40 min (2400 s) |

Tabla 6. 2. Listado de tareas y tiempo de ejecución de cada una de ellas. Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente figura se muestra la duración de cada tarea y su comparación respecto al Takt Time antes de realizar el equilibrado de la línea.

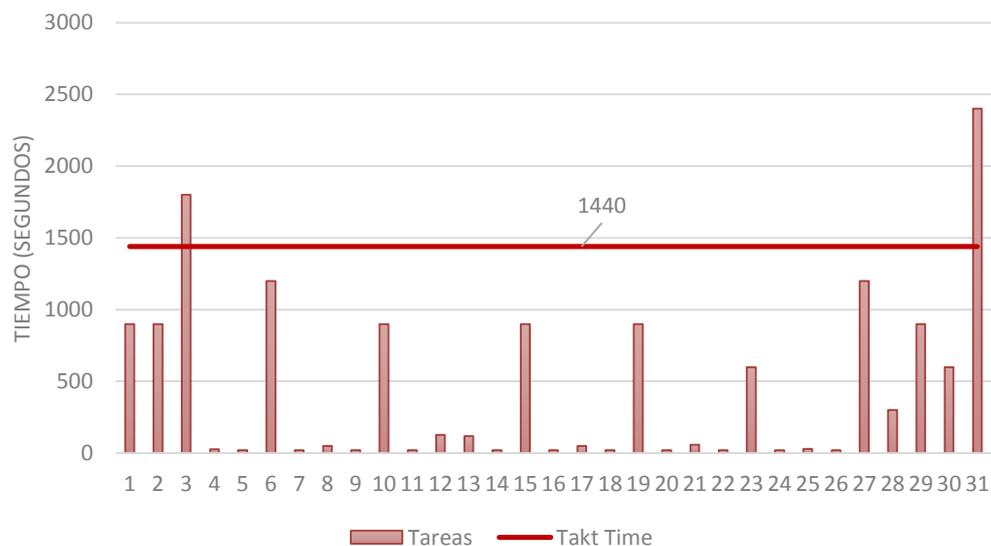


Figura 6.2. Duración de las tareas antes del equilibrado. Fuente: Elaboración propia.

Tras el cálculo de los parámetros de producción necesarios y del balanceo de la línea desarrollado en el Anexo B, se concluye que son necesarias 12 estaciones de trabajo para agrupar las 31 tareas que conforman el proceso de fabricación de la célula. Las tareas se agrupan según se muestra en la tabla 6.3 y en la figura 6.3.

| Estación | Tareas | Estación | Tareas |
|----------|-----------------------|----------|-----------------|
| 1 | 1 | 7 | 19, 20 y 21 |
| 2 | 2 | 8 | 23, 24, 25 y 26 |
| 3 | 3 | 9 | 27 |
| 4 | 4, 5, 6, 7, 13 y 14 | 10 | 28 y 29 |
| 5 | 8, 9, 15, 16, 17 y 18 | 11 | 31 |
| 6 | 10, 11, 12 y 22 | 12 | 30 |

Tabla 6. 3. Tareas asociadas a cada estación de trabajo. Fuente: Elaboración Propia.

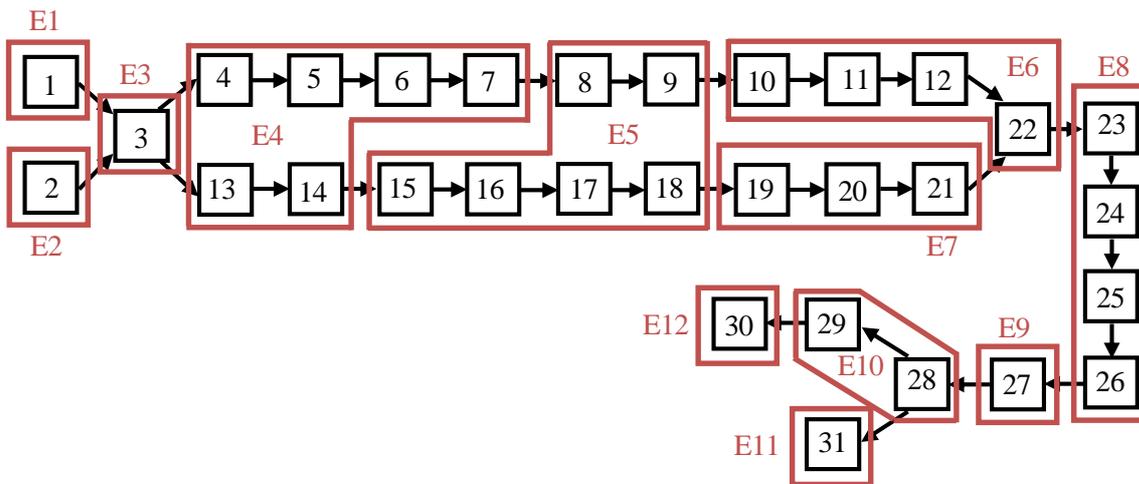


Figura 6.3. Diagrama de secuencia de las tareas y su agrupación por estaciones de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del equilibrado se obtiene la siguiente figura:

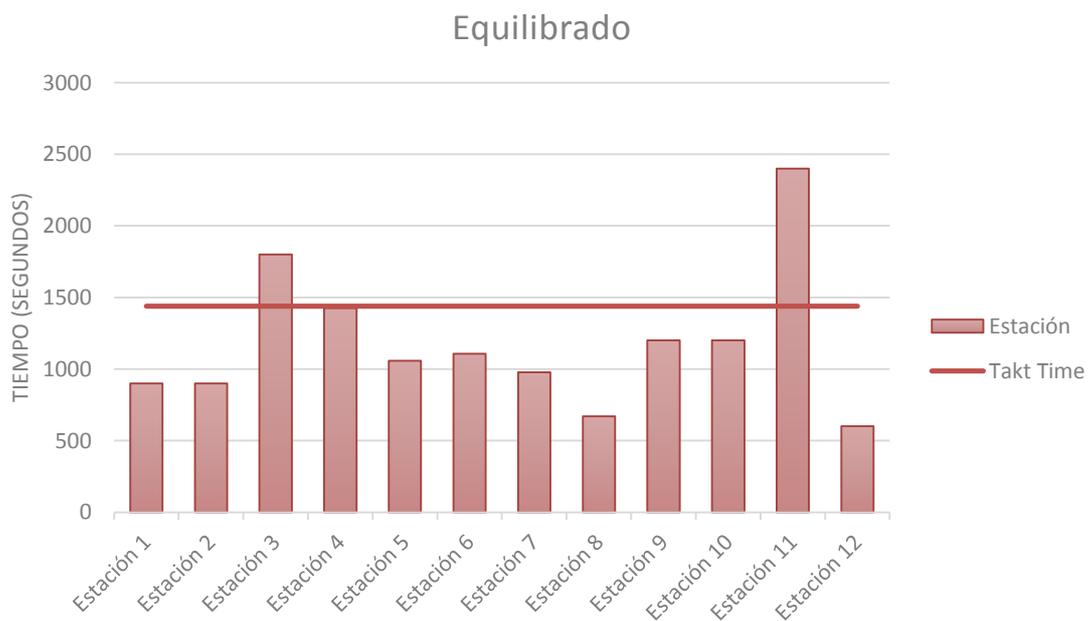


Figura 6.4. Solución del equilibrado de la producción de la célula en la situación final. Fuente: Elaboración Propia.

Puede observarse que las estaciones 3 y 11 a las que están asociadas las tareas de preparación y puesta a punto de las máquinas y limpieza de la célula, respectivamente, sobrepasan el tiempo disponible de cada estación marcado por el Takt Time. Esto, a priori, no supone ningún problema. Por un lado la limpieza de la célula se realiza una vez que ha finalizado la producción de las piezas en el interior de la célula, por lo que no influye directamente en el tiempo de fabricación de las piezas demandadas durante el turno. Por otro, la preparación de las máquinas sí es esencial para el inicio de la fabricación, sin embargo el tiempo que dicha tarea excede del tiempo disponible es de 6 minutos, tiempo que en principio parece razonable poder asumir sin que se produzcan retrasos en la fabricación.

6.3. Conclusiones

El contenido desarrollado en este Trabajo ha pretendido dar solución, a través de la metodología de trabajo Lean Manufacturing, a los principales desperdicios a los que están expuestas las empresas de la industria aeronáutica actualmente. Inicialmente y mediante una descripción de las características de la Fabricación Celular y de los principios, técnicas y herramientas Lean se ha querido introducir al lector el sistema de fabricación más idóneo para la producción de piezas para aviones y la nueva filosofía de trabajo que persigue la excelencia en todos los ámbitos de la producción. Sin embargo, el primer objetivo perseguido ha sido el estudio y la determinación del sistema productivo de una célula autónoma de fabricación de piezas mediante control numérico. Tras determinar sus principales características y analizar los desperdicios generados durante la producción, se han estudiado posibles alternativas que, desde la metodología Lean, dieran solución a dichos desperdicios, hasta encontrar la solución idónea.

En el desarrollo del documento se han ido obteniendo una serie de resultados que dan lugar a las siguientes conclusiones:

- Un sistema de fabricación basado en células de trabajo en forma de U constituye la manera más eficiente de producción, en cuanto a la reducción de tiempos de fabricación y movimientos de material en su interior.
- El empleo de la programación, tanto en el proceso de diseño de las piezas con los programas CAD, como en las operaciones de mecanizado mediante CN, confieren un mayor grado de flexibilidad al proceso de fabricación en cuanto a posibles modificaciones en los atributos de diseño o en el volumen de producción demandado.
- El uso de la automatización de las tareas de alimentación de las máquinas, transporte, y manipulación de material en el interior de la célula agilizan el tiempo de fabricación total y permite que los operarios se ocupen de otras tareas eliminando las pesadas y repetitivas operaciones de carga y descarga de tochos y piezas de las máquinas.
- El producto que se desea fabricar en la célula es una familia de piezas compuesta por dos piezas pequeñas metálicas que sirven de unión en la sección 25 del avión C-295 de Airbus. La producción diaria es de 40 piezas, estableciéndose dos turnos diarios en los que, en cada uno, tres operarios y un supervisor llevan a cabo el proceso de fabricación de 20 piezas.
- Para llevar a cabo la fabricación de las piezas, la célula inicialmente consta de cinco máquinas (dos fresadoras de CN, una rectificadora de CN, una máquina de medición de coordenadas de CN y una máquina de limpieza manual), dos robots móviles para la manipulación de material y una cinta transportadora, además de varios estantes para la colocación de tochos, piezas y útiles.
- Durante la producción de las piezas se han estudiado dos situaciones. Una, de *fabricación ideal*, en la que no se producen incidencias que puedan interrumpir el proceso de producción e incrementar el tiempo de fabricación, como el desecho de piezas defectuosas por fallos dimensionales o de calidad o averías en las máquinas. Otra, de *fabricación con operaciones de sobreprocesamiento*, en la que tras la detección y aislamiento de las piezas defectuosas de la secuencia de operaciones se vuelven a fabricar las piezas desechadas. Es conveniente aclarar que

la situación más común de fabricación es la ideal, aunque con cierta frecuencia se producen algunas piezas defectuosas.

- El tiempo de fabricación ideal de las 20 piezas, desde que se introducen los tochos en la célula hasta que salen de la máquina de limpieza es de 6 horas y 10 minutos aproximadamente. Por otro lado, el número máximo de piezas defectuosas que llegan a producirse en la célula durante un turno de trabajo es 4, por lo que el tiempo adicional que se necesita para fabricar dichas piezas, depende del número y del tipo de cada una. El tiempo máximo adicional de fabricación se da cuando se producen 4 piezas defectuosas de tipo A, siendo éste de 2 horas y 19 minutos.
- Los principales desperdicios generados durante la fabricación son: esperas de las piezas que permanecen sin ser procesadas debido a la diferente capacidad de producción de las máquinas, movimientos de material y desplazamientos de operarios por la planta de fabricación, defectos de calidad en el producto fabricado y operaciones de sobreprocesamiento debido a dichos defectos.
- Como solución a la generación de dichos desperdicios se proponen tres alternativas para la disminución del tiempo de espera de las piezas en el interior de la célula y para la optimización de los desplazamientos de los operarios en la planta. Dichas alternativas son: duplicación de la maquinaria existente, cambio de la configuración de la célula adoptando un layout centrado en robots y reubicación de la célula y los almacenes respecto a la planta.
- A la vista de los resultados y de los objetivos que se desean alcanzar, se toman como solución las propuestas defendidas por las alternativas 1 y 3, es decir se duplica la maquinaria y se reubican las instalaciones de la planta. Al duplicar la maquinaria, en este caso la rectificadora por ser la máquina que genera el mayor tiempo de espera de las piezas, se consigue una reducción de 1 hora y 35 minutos en el tiempo de fabricación total. Esto se traduce a que en el mismo tiempo de fabricación de la situación inicial, 6 horas y 10 minutos, pueden fabricarse 28 piezas, en lugar de 20. Por su parte, al reubicar los almacenes externos a la célula se reducen y optimizan los desplazamientos de los operarios por la planta, lo que desemboca en una disminución en la duración de las tareas exteriores a la célula. Esta reducción de tiempo incurre directamente en el ahorro de costes asociados a la fabricación de las piezas.
- Mediante el equilibrado de la línea de producción se consigue agrupar las 31 tareas existentes en la fabricación ideal de las piezas, en 12 estaciones de trabajo que operan simultáneamente. Con el equilibrado se consigue adecuar la capacidad de producción al volumen de productos demandados, maximizando la eficiencia de los procesos y minimizando el tiempo de inactividad de los mismos.
- Las herramientas Lean que se han aplicado durante la concepción y determinación de la célula tanto en la situación inicial, como en la solución propuesta (sistema Pull, estandarización de las operaciones, SMED, 5 S y TPM) aportan numerosas ventajas al sistema productivo. Por ejemplo, el sistema Pull agiliza la respuesta de la producción ante fluctuaciones de la demanda; la estandarización proporciona una mejor forma de realizar el trabajo; con la herramienta SMED se reduce el tiempo de cambio de las herramientas, disminuyendo así el tiempo de fabricación; con las 5 S se mejoran las condiciones de trabajo, lo que aumenta el bienestar y la sensación de seguridad entre los empleados; el TPM proporciona las técnicas de mantenimiento de los equipos y proporciona los medios para un mejor conocimiento y utilización de los mismos. Teniendo en cuenta las técnicas del TPM se elaboran planes de mantenimiento y controles predictivos y preventivos de las máquinas para eliminar los defectos que se producen en las piezas, disminuyendo la frecuencia de fabricación de piezas defectuosas. Asimismo, para la célula propuesta como solución final, la implantación de un sistema de control visual mediante un panel informativo SQCDP y sus correspondientes KPI contribuyen a la mejora de la gestión de la célula. Del mismo modo, el empleo de sistemas antierrores o Poka-Yoke y de luces Andon reducen las tareas de supervisión de los trabajadores y optimizan el seguimiento y control de la producción.

Como punto final a este trabajo puede sugerirse una solución a largo plazo a la disminución de los defectos de las piezas provocados por errores en el mecanizado de las mismas. Para ello se propone la automatización e inclusión de las operaciones de verificación en cada máquina. De esta forma si en una pieza se produce un fallo durante el fresado, ésta se desecha inmediatamente sin necesidad de esperar a que concluya el proceso de rectificado y el de verificación en una máquina especializada para ello. Se prescindiría de la máquina de medición de coordenadas y se reduciría el tiempo de fabricación y los costes por sobreprocesamiento.

ANEXO A: TIEMPOS DE SOBREPROCESAMIENTO

El proceso de fabricación de las piezas dentro de la célula no está exento de posibles incidencias o interrupciones que puedan alterar el flujo normal de operaciones y tiempos de fabricación. Entre las más comunes se encuentra el sobreprocesamiento [sección 3.4] debido a la fabricación de piezas defectuosas. Este tipo de desperdicio conlleva la repetición de los procesos de mecanizado y la pérdida de tiempo empleado en la fabricación de las piezas no conformes.

En este Anexo se van a detallar los tiempos de fabricación que habría que añadir al tiempo de fabricación sin incidentes si se detectasen piezas defectuosas entre las 20 primeras mecanizadas en las células de la situación inicial y de las alternativas 1 y 2. Como máximo se producen 4 piezas defectuosas en un turno, por lo que existen 14 combinaciones posibles de piezas que se deban volver a fabricar.

A.1. Situación inicial

El método empleado para el cálculo de los tiempos de re-procesos es similar al mostrado en las tablas 4.1 y 4.2 del capítulo 4. En la tabla A.1 se muestran los tiempos de fabricación necesarios para volver a producir una, dos o tres piezas de tipo A. Como puede observarse en dicha tabla, y en las siguientes, A.2, A.3 y A.4, si el lote completo de piezas a fabricar es del mismo tipo, A o B, no existen esperas a la entrada de la rectificadora. Esto es debido a que sólo se emplea una de las fresadoras, la *fresadora 1* en caso de ser piezas de tipo A y la *fresadora 2* si son piezas únicamente de tipo B, por lo que el proceso pasa a ser en serie en el que las piezas, una detrás de otra, van pasando por las máquinas. Podría haberse decidido emplear ambas máquinas de corte para fresar las piezas de cualquier tipo, sin embargo, esta elección supondría la reprogramación de la fresadora que no fabrique dicho tipo de piezas habitualmente. Esto supondría una pérdida de tiempo mayor que el tiempo que las piezas puedan esperar para ser procesadas en la máquina siguiente.

Para volver a fabricar una pieza de tipo A se precisan **4546 segundos** (1 h 15 min 46 s) adicionales. El tocho de tipo A, una vez colocado en la cinta, va pasando por todas las máquinas y robots, tardando el tiempo que se especifica en la tercera columna de la tabla. En esta ocasión, la pieza tampoco debe esperar ningún tiempo establecido para ser introducida en la máquina de limpieza, ya que solo se fabrica esa pieza.

La fabricación de dos y tres piezas de tipo A, es similar a la de una única pieza. Tras el fresado de la primera pieza, y tal y como se detalló en las tablas 4.1 y 4.2, la segunda y la tercera piezas son colocadas en la cinta 23 segundos antes de que el robot coloque la pieza anterior en la cinta, tras su fresado, para que las piezas lleguen al robot 5 segundos después de eso, y el robot tenga tiempo de moverse para cogerlas. Como el rectificado de cualquier pieza finaliza antes que el fresado de la pieza posterior, no se producen esperas a la entrada de la rectificadora. El único tiempo de espera se produce durante la formación del lote de piezas para ser limpiadas. Cada pieza permanece 1245 segundos en el estante por cada pieza que tiene que esperar para completar el lote. Por tanto, fabricar nuevamente dos piezas de tipo A conlleva un tiempo adicional de **5791 segundos** (1 h 36 min 31 s) y 3 piezas, **7036 segundos** (1 h 57 min 16 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | A | A | A | A | A |
|------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 0 | 1245 | 0 | 1245 | 2490 |
| Entrada cinta-robot | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 0/28 | 1245/1273 | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 28/48 | 1273/1293 | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 48/1248 | 1293/2493 | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1248/1268 | 2493/2513 | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 |
| Cinta-robot 2 | 10 m | 100 s | 1268/1368 | 1268/1368 | 2513/2613 | 1268/1368 | 2513/2613 | 3758/3858 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1368/1388 | 1368/1388 | 2613/2633 | 1368/1388 | 2613/2633 | 3858/3878 |
| Rectificado | - | 15 min | 1388/2288 | 1388/2288 | 2633/3533 | 1388/2288 | 2633/3533 | 3878/4778 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2288/2308 | 2288/2308 | 3533/3553 | 2288/2308 | 3533/3553 | 4778/4798 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2308/2356 | 2308/2356 | 3553/3601 | 2308/2356 | 3553/3601 | 4798/4846 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2356/2376 | 2356/2376 | 3601/3621 | 2356/2376 | 3601/3621 | 4846/4866 |
| Verificación | - | 10 min | 2376/2976 | 2376/2976 | 3621/4221 | 2376/2976 | 3621/4221 | 4866/5466 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2976/2996 | 4221/4241 | 2976/2996 | 4221/4241 | 5466/5486 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2996/3026 | 2996/3026 | 4241/4271 | 2996/3026 | 4241/4271 | 5486/5516 |
| Espera lote | | | - | 3026/4271 | - | 3026/5516 | 4271/5516 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3026/3046 | 4271/4291 | 4271/4291 | 5516/5536 | 5516/5536 | 5516/5536 |
| Limpieza | - | 20 min | 3046/4246 | 4291/5491 | 4291/5491 | 5536/6736 | 5536/6736 | 5536/6736 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4246/4546 | 5491/5791 | 5491/5791 | 6736/7036 | 6736/7036 | 6736/7036 |
| | | | Un lote | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 1. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA. Fuente: Elaboración propia.

La producción de cuatro piezas de tipo A se muestra en la tabla A.2 y es muy similar a los casos anteriores, existiendo diferencias en la formación de lotes de limpieza. Al ser cuatro piezas las que han de fabricarse y tres, el máximo de piezas que pueden introducirse simultáneamente en la máquina de limpieza, se forman dos lotes de dos piezas cada uno. El tiempo total de fabricación de cuatro piezas de tipo A es de **8281 segundos** (2 h 18 min 1 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | A | A | A |
|------------------------------|----------|---------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 1245 | 2490 | 3735 |
| Entrada cinta-robot | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 | 3735/3763 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 | 3763/3783 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 | 3783/4983 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 | 4983/5003 |
| Cinta-robot 2 | 10 m | 100 s | 1268/1368 | 2513/2613 | 3758/3858 | 5003/5103 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1368/1388 | 2613/2633 | 3858/3878 | 5103/5123 |
| Rectificado | - | 15 min | 1388/2288 | 2633/3533 | 3878/4778 | 5123/6023 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2288/2308 | 3533/3553 | 4778/4798 | 6023/6043 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2308/2356 | 3553/3601 | 4798/4846 | 6043/6091 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2356/2376 | 3601/3621 | 4846/4866 | 6091/6111 |
| Verificación | - | 10 min | 2376/2976 | 3621/4221 | 4866/5466 | 6111/6711 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 4221/4241 | 5466/5486 | 6711/6731 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2996/3026 | 4241/4271 | 5486/5516 | 6731/6761 |
| Espera lote | | | 3026/4271 | - | 5516/6761 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4271/4291 | 4271/4291 | 6761/6781 | 6761/6781 |
| Limpieza | - | 20 min | 4291/5491 | 4291/5491 | 6781/7981 | 6781/7981 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5491/5791 | 5491/5791 | 7981/8281 | 7981/8281 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 2. Tiempo de reprocesos de piezas cuya secuencia sea AAAA. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas A.3 y A.4 se muestran los tiempos asociados a la fabricación de una, dos, tres y cuatro piezas de tipo B. Al igual que en el caso de fabricar únicamente piezas de tipo A y por las mismas razones, las únicas esperas que se producen son las asociadas a la formación de los lotes de limpieza.

Cuando se fabrican más de una pieza, cada una es introducida en la cinta 945 segundos después de la anterior, 73 segundos antes de que el robot posicione la pieza anterior en la cinta tras su fresado. De esta manera la siguiente pieza llega al robot 5 segundos después de esto, tiempo empleado por el robot en el movimiento de soltar una pieza y coger la siguiente. Los tiempos de cada movimiento u operación son los mostrados en la tercera columna de las tablas.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | B | B | B | B | B | B |
|------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 0 | 945 | 0 | 945 | 1890 |
| Entrada cinta-robot | 7.75 m | 78 s | 0/78 | 0/78 | 945/1023 | 0/78 | 945/1023 | 1890/1968 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 78/98 | 78/98 | 1023/1043 | 78/98 | 1023/1043 | 1968/1988 |
| Fresado | - | 15 min | 98/998 | 98/998 | 1043/1943 | 98/998 | 1043/1943 | 1988/2888 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 998/1018 | 998/1018 | 1943/1963 | 998/1018 | 1943/1963 | 2888/2908 |
| Cinta-robot 2 | 5 m | 50 s | 1018/1068 | 1018/1068 | 1963/2013 | 1018/1068 | 1963/2013 | 2908/2958 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1068/1088 | 1068/1088 | 2013/2033 | 1068/1088 | 2013/2033 | 2958/2978 |
| Rectificado | - | 15 min | 1088/1988 | 1088/1988 | 2033/2933 | 1088/1988 | 2033/2933 | 2978/3878 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 1988/2008 | 1988/2008 | 2933/2953 | 1988/2008 | 2933/2953 | 3878/3898 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2008/2056 | 2008/2056 | 2953/3001 | 2008/2056 | 2953/3001 | 3898/3946 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2056/2076 | 2056/2076 | 3001/3021 | 2056/2076 | 3001/3021 | 3946/3966 |
| Verificación | - | 10 min | 2076/2676 | 2076/2676 | 3021/3621 | 2076/2676 | 3021/3621 | 3966/4566 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 2676/2696 | 2676/2696 | 3621/3641 | 2676/2696 | 3621/3641 | 4566/4586 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2696/2726 | 2696/2726 | 3641/3671 | 2696/2726 | 3641/3671 | 4586/4616 |
| Espera lote | | | - | 2726/3671 | - | 2726/4616 | 3671/4616 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 2726/2746 | 3671/3691 | 3671/3691 | 4616/4636 | 4616/4636 | 4616/4636 |
| Limpieza | - | 20 min | 2746/3946 | 3691/4891 | 3691/4891 | 4636/5836 | 4636/5836 | 4636/5836 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 3946/4246 | 4891/5191 | 4891/5191 | 5836/6136 | 5836/6136 | 5836/6136 |
| | | | Un lote | | Un lote | | | Un lote |

Tabla A. 3. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | B | B | B | B |
|------------------------------|----------|---------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 945 | 1890 | 2835 |
| Entrada cinta-robot | 7.75 m | 78 s | 0/78 | 945/1023 | 1890/1968 | 2835/2913 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 78/98 | 1023/1043 | 1968/1988 | 2913/2933 |
| Fresado | - | 15 min | 98/998 | 1043/1943 | 1988/2888 | 2933/3833 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 998/1018 | 1943/1963 | 2888/2908 | 3833/3853 |
| Cinta-robot 2 | 5 m | 50 s | 1018/1068 | 1963/2013 | 2908/2958 | 3853/3903 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1068/1088 | 2013/2033 | 2958/2978 | 3903/3923 |
| Rectificado | - | 15 min | 1088/1988 | 2033/2933 | 2978/3878 | 3923/4823 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 1988/2008 | 2933/2953 | 3878/3898 | 4823/4843 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2008/2056 | 2953/3001 | 3898/3946 | 4843/4891 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2056/2076 | 3001/3021 | 3946/3966 | 4891/4911 |
| Verificación | - | 10 min | 2076/2676 | 3021/3621 | 3966/4566 | 4911/5511 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 2676/2696 | 3621/3641 | 4566/4586 | 5511/5531 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2696/2726 | 3641/3671 | 4586/4616 | 5531/5561 |
| Espera lote | | | 2726/3671 | - | 4616/5561 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3671/3691 | 3671/3691 | 5561/5581 | 5561/5581 |
| Limpieza | - | 20 min | 3691/4891 | 3691/4891 | 5581/6781 | 5581/6781 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4891/5191 | 4891/5191 | 6781/7081 | 6781/7081 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 4. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para fabricar una sola pieza, son necesarios **4246 segundos** (1 h 10 min 46 s); cuando se fabrican dos, **5191 segundos** (1 h 26 min 31 s); cuando se fabrican tres, **6136 segundos** (1 h 42 min 16 s); y cuando son cuatro, **7081 segundos** (1 h 58 min 1 s).

Hasta ahora se han expuesto los tiempos de fabricación de todas las combinaciones formadas por piezas de un mismo tipo, por lo que las combinaciones restantes se componen de piezas de ambos tipos. Se emplean ambas fresadoras, cada una para el tipo de pieza que mecaniza habitualmente, por lo que de nuevo se obtienen esperas a la entrada de la rectificadora.

En las tablas A.5 y A.6 se detalla la fabricación de las combinaciones restantes de volver a producir dos y tres piezas. En la tabla A.5 se reflejan los tiempos de tener que fabricar dos piezas, una de cada tipo, y tres piezas, una de tipo A y dos de tipo B. En la tabla A.6 se especifica la fabricación de dos piezas de tipo A y una de tipo B.

La fabricación de una pieza de cada tipo (tabla A.5) es muy similar a la que se detalló en las tablas 4.1 y 4.2 para las piezas A1 y B1. La única diferencia es que el tiempo de espera de las piezas para formar un lote a la entrada de la máquina de limpieza es menor, ya que son dos piezas y no tres las que componen dicho lote.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A | B | B |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 48 | 0 | 48 | 993 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/7.75 m | 28/78 s | 0/28 | 48/126 | 0/28 | 48/126 | 993/1071 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 126/146 | 28/48 | 126/146 | 1071/1091 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 146/1046 | 48/1248 | 146/1046 | 1091/1991 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1046/1066 | 1248/1268 | 1046/1066 | 1991/2011 |
| Cinta-robot 2 | 10/5 m | 100/50 s | 1268/1368 | 1066/1116 | 1268/1368 | 1066/1116 | 2011/2061 |
| Espera | - | - | 1368/2056 | - | 1368/2056 | - | 2061/2996 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 1116/1136 | 2056/2076 | 1116/1136 | 2996/3016 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 1136/2036 | 2076/2976 | 1136/2036 | 3016/3916 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2036/2056 | 2976/2996 | 2036/2056 | 3916/3936 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 2056/2104 | 2996/3044 | 2056/2104 | 3936/3984 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 2104/2124 | 3044/3064 | 2104/2124 | 3984/4004 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 2124/2724 | 3064/3664 | 2124/2724 | 4004/4604 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 2724/2744 | 3664/3684 | 2724/2744 | 4604/4624 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 2744/2774 | 3684/3714 | 2744/2774 | 4624/4654 |
| Espera lote | | | - | 2774/3714 | 3714/4654 | 2774/4654 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3714/3734 | 3714/3734 | 4654/4674 | 4654/4674 | 4654/4674 |
| Limpieza | - | 20 min | 3734/4934 | 3734/4934 | 4674/5874 | 4674/5874 | 4674/5874 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4934/5234 | 4934/5234 | 5874/6174 | 5874/6174 | 5874/6174 |
| | | | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 5. Tiempo de reprocesos de piezas cuya secuencia sea AB o ABB. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma el tocho A, una vez colocado en la cinta, es introducido por el robot en la *fresadora 1* y en ese mismo instante, en el segundo 48, el tocho B es colocado por el operario en la cinta y tras llegar al robot ya posicionado en la *fresadora 2*, es introducido en dicha máquina. Tras finalizar el fresado de la pieza B, que termina antes que el de la pieza A, comienza el rectificado de la misma. Hasta que no concluya este proceso y el posicionamiento de la pieza B en la cinta, la pieza A no puede ser introducida en la rectificadora, por lo que debe esperar 688 segundos hasta que eso ocurra. Ambas piezas, tras pasar por la rectificadora y la máquina de medición de coordenadas llegan al estante situado al final de la cinta donde el *operario 3* las introduce en la máquina de limpieza. El tiempo total necesitado es de **5234 segundos** (1 h 27 min 14 s).

Otra de las combinaciones posibles a volver a fabricar está formada por dos piezas de tipo B y una de tipo A, que es muy similar al caso anterior. Únicamente se debería introducir un nuevo tocho de tipo B en la cinta. Dicho tocho se introduce, como siempre, 73 segundos antes de que el robot posicione la primera pieza de tipo B fresada nuevamente en la cinta, es decir, en el segundo 993. La segunda pieza de tipo B debe esperar a que la pieza A concluya con el rectificado, esperando un total de 935 segundos. Una vez posicionadas en el estante anterior a la máquina de limpieza, la primera pieza de tipo B, espera 1880 segundos, y la pieza A, 940 segundos, a la segunda pieza de tipo B para ser limpiadas. El tiempo de fabricación para este lote es de **6174 segundos** (1 h 42 min 54 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 48 | 1245 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/7.75 m | 28/78 s | 0/28 | 48/126 | 1245/1273 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 126/146 | 1273/1293 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 146/1046 | 1293/2493 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1046/1066 | 2493/2513 |
| Cinta-robot 2 | 10/5 m | 100/50 s | 1268/1368 | 1066/1116 | 2513/2613 |
| Espera | - | - | 1368/2056 | - | 2613/2996 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 1116/1136 | 2996/3016 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 1136/2036 | 3016/3916 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2036/2056 | 3916/3936 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 2056/2104 | 3936/3984 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 2104/2124 | 3984/4004 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 2124/2724 | 4004/4604 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 2724/2744 | 4604/4624 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 2744/2774 | 4624/4654 |
| Espera lote | | | 3714/4654 | 2774/4654 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4654/4674 | 4654/4674 | 4654/4674 |
| Limpieza | - | 20 min | 4674/5874 | 4674/5874 | 4674/5874 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5874/6174 | 5874/6174 | 5874/6174 |
| | | | Un lote | | |

Tabla A. 6. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA. Fuente: Elaboración propia.

Si, por el contrario, se han de fabricar dos piezas de tipo A y una de tipo B (tabla A.6), el proceso es similar al anterior, pero esta vez se introduce una segunda pieza de tipo A. Dicha pieza debe esperar 383 segundos a que la pieza de tipo A anterior termine el rectificado. Todo el proceso restante es similar al de los casos anteriores y el tiempo de fabricación, igual al de la situación anterior: **6174 segundos** (1 h 42 min 54 s).

En las siguientes tablas, A.7, A.8 y A.9, se anotan los tiempos de fabricación en los casos que deban fabricarse lotes de cuatro piezas de ambos tipos. Al anotarse los tiempos de fabricación de piezas de distinto tipo en una misma tabla, en la segunda y tercera columnas se han anotado la longitud de los desplazamientos y el tiempo de cada operación para ambos tipos de piezas, separados mediante una barra. De esta manera, el número de la izquierda corresponde a los desplazamientos y tiempos de las piezas de tipo A, y el de la derecha, a los de las piezas de tipo B.

En la tabla A.7 se muestra la combinación de dos piezas de tipo A y dos piezas de tipo B, cuyo proceso de fabricación es muy similar al de las piezas A1, B1, A2 y B2, de las tablas 4.1 y 4.2. La principal diferencia es la formación de lotes para la limpieza y los tiempos de espera asociados a dicho proceso. En esta situación la secuencia de entrada de las piezas es ABBA y la de salida de la máquina de verificación, BABA, como se comentó en la sección 4.2.7. Al fabricarse 4 piezas, se forman dos lotes de dos piezas para la limpieza de las mismas. El tiempo de fabricación total es de **7114 segundos** (1 h 58 min 34 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A | B |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 48 | 1245 | 1293 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/7.75 m | 28/78 s | 0/28 | 48/126 | 1245/1273 | 1293/1371 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 126/146 | 1273/1293 | 1371/1391 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 146/1046 | 1293/2493 | 1391/2291 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1046/1066 | 2493/2513 | 2291/2311 |
| Cinta-robot 2 | 10/5 m | 100/50 s | 1268/1368 | 1066/1116 | 2513/2613 | 2311/2361 |
| Espera | - | - | 1368/2056 | - | 2613/3936 | 2361/2996 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 1116/1136 | 3936/3956 | 2996/3016 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 1136/2036 | 3956/4856 | 3016/3916 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2036/2056 | 4856/4876 | 3916/3936 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 2056/2104 | 4876/4924 | 3936/3984 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 2104/2124 | 4924/4944 | 3984/4004 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 2124/2724 | 4944/5544 | 4004/4604 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 2724/2744 | 5544/5564 | 4604/4624 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 2744/2774 | 5564/5594 | 4624/4654 |
| Espera lote | | | - | 2774/3714 | - | 4654/5594 |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3714/3734 | 3714/3734 | 5594/5614 | 5594/5614 |
| Limpieza | - | 20 min | 3734/4934 | 3734/4934 | 5614/6814 | 5614/6814 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4934/5234 | 4934/5234 | 6814/7114 | 6814/7114 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 7. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAB. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A | A |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 48 | 1245 | 2490 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/7.75 m | 28/78 s | 0/28 | 48/126 | 1245/1273 | 2490/2518 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 126/146 | 1273/1293 | 2518/2538 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 146/1046 | 1293/2493 | 2538/3738 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1046/1066 | 2493/2513 | 3738/3758 |
| Cinta-robot 2 | 10/5 m | 100/50 s | 1268/1368 | 1066/1116 | 2513/2613 | 3758/3858 |
| Espera | - | - | 1368/2056 | - | 2613/2996 | 3858/3936 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 1116/1136 | 2996/3016 | 3936/3956 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 1136/2036 | 3016/3916 | 3956/4856 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2036/2056 | 3916/3936 | 4856/4876 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 2056/2104 | 3936/3984 | 4876/4924 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 2104/2124 | 3984/4004 | 4924/4944 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 2124/2724 | 4004/4604 | 4944/5544 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 2724/2744 | 4604/4624 | 5544/5564 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 2744/2774 | 4624/4654 | 5564/5594 |
| Espera lote | | | - | 2774/3714 | 4654/5594 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3714/3734 | 3714/3734 | 5594/5614 | 5594/5614 |
| Limpieza | - | 20 min | 3734/4934 | 3734/4934 | 5614/6814 | 5614/6814 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4934/5234 | 4934/5234 | 6814/7114 | 6814/7114 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 8. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla A.8 se detallan los tiempos de los procesos y movimientos de piezas durante la fabricación de tres piezas de tipo A y una pieza de tipo B. La fabricación se inicia colocando el primer tocho de tipo A en la cinta e introduciéndolo en la *fresadora 1*. 48 segundos después el tocho inicial de tipo B se coloca en la cinta y se dirige a la *fresadora 2*, donde el robot lo introduce. La primera pieza en acabar el fresado, la pieza B, es colocada por el robot en la cinta y dirigida hacia la rectificadora. La primera pieza de tipo A deberá esperar un determinado tiempo, hasta que el *robot 2* saque la pieza B de la rectificadora y la coloque en la cinta para poder ser introducida en la rectificadora. Por su parte, en el segundo 1245, se coloca el segundo tocho de tipo A en la cinta y el tercero, en el segundo 2490. Ambos deben esperar a la entrada de la rectificadora el tiempo oportuno, hasta que la pieza anterior haya terminado el rectificado y haya sido colocada en la cinta. De este modo todas las piezas van completando su recorrido hasta llegar a manos del operario, quien por lotes de dos, las introduce en la máquina de limpieza. El tiempo de fabricación de esta combinación es de **7114 segundos** (1 h 58 min 34 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | B | B |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 48 | 993 | 1938 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/7.75 m | 28/78 s | 0/28 | 48/126 | 993/1071 | 1938/2016 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 126/146 | 1071/1091 | 2016/2036 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 146/1046 | 1091/1991 | 2036/2936 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1046/1066 | 1991/2011 | 2936/2956 |
| Cinta-robot 2 | 10/5 m | 100/50 s | 1268/1368 | 1066/1116 | 2011/2061 | 2956/3006 |
| Espera | - | - | 1368/2056 | - | 2061/2996 | 3006/3936 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 2056/2076 | 1116/1136 | 2996/3016 | 3936/3956 |
| Rectificado | - | 15 min | 2076/2976 | 1136/2036 | 3016/3916 | 3956/4856 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2976/2996 | 2036/2056 | 3916/3936 | 4856/4876 |
| Cinta-robot 2 | 4.8 m | 48 s | 2996/3044 | 2056/2104 | 3936/3984 | 4876/4924 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 3044/3064 | 2104/2124 | 3984/4004 | 4924/4944 |
| Verificación | - | 10 min | 3064/3664 | 2124/2724 | 4004/4604 | 4944/5544 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3664/3684 | 2724/2744 | 4604/4624 | 5544/5564 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3684/3714 | 2744/2774 | 4624/4654 | 5564/5594 |
| Espera lote | | | - | 2774/3714 | 4654/5594 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3714/3734 | 3714/3734 | 5594/5614 | 5594/5614 |
| Limpieza | - | 20 min | 3734/4934 | 3734/4934 | 5614/6814 | 5614/6814 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4934/5234 | 4934/5234 | 6814/7114 | 6814/7114 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 9. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla A.9, se muestra la última de las combinaciones posibles, la fabricación de una pieza de tipo A y tres de tipo B. Los tiempos de fabricación de la primera pieza de cada tipo son completamente iguales a los del caso anterior, obteniéndose el primer lote de piezas limpias 5234 segundos después de iniciar la fabricación. El tercer y cuarto tocho de esta combinación, ambos de tipo B, se introducen en la cinta en los segundos 993 y 1938, respectivamente. Ambos esperan, como siempre, el tiempo necesario para que la pieza anterior termine su rectificado y sea colocada en la cinta, para poder ser ubicados por el robot en dicha máquina. Tras concluir este proceso, son sometidas a la verificación e introducidas en la máquina de limpieza simultáneamente. El tiempo final de fabricación de estas 4 piezas es también de **7114 segundos** (1 h 58 min 34 s).

A.2. Alternativa 1

En la configuración de célula con duplicación de maquinaria propuesta como *alternativa 1* [subsección 5.1.1] a la situación inicial, también se producen piezas defectuosas con una determinada frecuencia. El método empleado para el cálculo de los tiempos es similar al usado en la sección anterior y en las tablas 5.1 y 5.2, en las que se detalla el proceso de fabricación ideal, sin sobreprocesamiento, de la alternativa 1.

En la tabla A.10 se muestran los tiempos de fabricación necesarios para volver a producir una, dos o tres piezas de tipo A. Cuando la secuencia completa de piezas a fabricar es de un solo tipo, A o B, sólo se emplea la fresadora y la rectificadora correspondiente al mecanizado de las piezas del tipo que tenga asociado, por las mismas razones descritas en la sección anterior.

Para volver a fabricar una pieza de tipo A se precisan **4576 segundos** (1 h 16 min 16 s) adicionales. El tocho de tipo A, una vez colocado en la cinta, va pasando primero por la *fresadora 1* y la *rectificadora 1*, recorriendo las distancias oportunas entre las máquinas (que se muestran en la segunda columna) sobre la cinta transportadora y siendo manipulada por el *robot 1*. Una vez acabado el rectificado, la pieza es dirigida hasta la máquina de medición de coordenadas donde el *robot 3* la introduce en la máquina. Tras esto, la pieza es devuelta de nuevo a la cinta e introducida en la solución de limpieza por el *operario 3*. Todos los tiempos invertidos en los movimientos y en los procesos de cada máquina se muestran en la tercera columna de la tabla.

La fabricación de dos y tres piezas de tipo A, es similar a la de una única pieza. Tras el fresado de la primera pieza, y tal y como se detalló en las tablas 5.1 y 5.2, la segunda y la tercera pieza son colocadas en la cinta en los instantes 1245 y 2490. Como el rectificado de cualquier pieza finaliza antes que el fresado de la pieza posterior, no se producen esperas a la entrada de la rectificadora. El único tiempo de espera se produce durante la formación del lote de piezas para ser limpiadas. Cada pieza permanece 1245 segundos en el estante por cada pieza que tiene que esperar para completar el lote. Por tanto, fabricar nuevamente dos piezas de tipo A conlleva un tiempo adicional de **5821 segundos** (1 h 37 min 1 s) y tres piezas, **7066 segundos** (1 h 57 min 46 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | A | A | A | A | A |
|-------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | - | - | 0 | 0 | 1245 | 0 | 1245 | 2490 |
| Entrada cinta-robot 1 | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 0/28 | 1245/1273 | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 |
| Robot 1-fresadora 1 | - | 20 s | 28/48 | 28/48 | 1273/1293 | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 48/1248 | 1293/2493 | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1248/1268 | 2493/2513 | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 |
| Cinta-robot 1 | 5 m | 50 s | 1268/1318 | 1268/1318 | 2513/2563 | 1268/1318 | 2513/2563 | 3758/3808 |
| Robot 1-rectificadora 1 | - | 20 s | 1318/1338 | 1318/1338 | 2563/2583 | 1318/1338 | 2563/2583 | 3808/3828 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1338/2238 | 2583/3483 | 1338/2238 | 2583/3483 | 3828/4728 |
| Rectificadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2238/2258 | 3483/3503 | 2238/2258 | 3483/3503 | 4728/4748 |
| Cinta-robot 3 | 12.8 m | 128 s | 2258/2386 | 2258/2386 | 3503/3631 | 2258/2386 | 3503/3631 | 4748/4876 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2386/2406 | 2386/2406 | 3631/3651 | 2386/2406 | 3631/3651 | 4876/4896 |
| Verificación | - | 10 min | 2406/3006 | 2406/3006 | 3651/4251 | 2406/3006 | 3651/4251 | 4896/5496 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3006/3026 | 3006/3026 | 4251/4271 | 3006/3026 | 4251/4271 | 5496/5516 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3026/3056 | 3026/3056 | 4271/4301 | 3026/3056 | 4271/4301 | 5516/5546 |
| Espera lote | - | - | - | - | - | 3056/5546 | 4301/5546 | - |
| Estante-máquina de limpieza | - | 20 s | 3056/3076 | 4301/4321 | 4301/4321 | 5546/5566 | 5546/5566 | 5546/5566 |
| Limpieza | - | 20 min | 3076/4276 | 4321/5521 | 4321/5521 | 5566/6766 | 5566/6766 | 5566/6766 |
| Máq. limpieza-secado-estante | - | 5 min | 4276/4576 | 5521/5821 | 5521/5821 | 6766/7066 | 6766/7066 | 6766/7066 |
| | | | Un lote |

Tabla A. 10. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

La producción de cuatro piezas de tipo A se muestra en la tabla A.11 y es muy similar a los casos anteriores, existiendo diferencias en la formación de lotes de limpieza. El tiempo total de fabricación es de **8311 segundos** (2 h 18 min 31 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | A | A | A |
|-------------------------------|----------|---------|-------------|--------------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | - | - | 0 | 1245 | 2490 | 3735 |
| Entrada cinta-robot | 2.75 m | 28 s | 0/28 | 1245/1273 | 2490/2518 | 3735/3763 |
| Robot 1-fresadora 1 | - | 20 s | 28/48 | 1273/1293 | 2518/2538 | 3763/3783 |
| Fresado | - | 20 min | 48/1248 | 1293/2493 | 2538/3738 | 3783/4983 |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 2493/2513 | 3738/3758 | 4983/5003 |
| Cinta-robot 1 | 5 m | 50 s | 1268/1318 | 2513/2563 | 3758/3808 | 5003/5053 |
| Robot 1-rectificadora 1 | - | 20 s | 1318/1338 | 2563/2583 | 3808/3828 | 5053/5073 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 2583/3483 | 3828/4728 | 5073/5973 |
| Rectificadora 1-robot 1-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 3483/3503 | 4728/4748 | 5973/5993 |
| Cinta-robot 3 | 12.8 m | 128 s | 2258/2386 | 3503/3631 | 4748/4876 | 5993/6121 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2386/2406 | 3631/3651 | 4876/4896 | 6121/6141 |
| Verificación | - | 10 min | 2406/3006 | 3651/4251 | 4896/5496 | 6141/6741 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3006/3026 | 4251/4271 | 5496/5516 | 6741/6761 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3026/3056 | 4271/4301 | 5516/5546 | 6761/6791 |
| Espera lote | - | - | 3056/4301 | - | 5546/6791 | - |
| Estante-máquina de limpieza | - | 20 s | 4301/4321 | 4301/4321 | 6791/6811 | 6791/6811 |
| Limpieza | - | 20 min | 4321/5521 | 4321/5521 | 6811/8011 | 6811/8011 |
| Máq. limpieza-secado-estante | - | 5 min | 5560/5860 | 5560/5860 | 8011/8311 | 8011/8311 |
| | | | Primer lote | Segundo lote | | |

Tabla A. 11. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AAAA en la célula de la alternativa 1. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas A.12 y A.13 se muestran los tiempos asociados a la fabricación de una, dos, tres y cuatro piezas de tipo B. En este caso, solo se emplean la *fresadora 2* y la *rectificadora 2* para el mecanizado de las piezas. Al igual que en el caso de fabricar únicamente piezas de tipo A, las únicas esperas que se producen son las asociadas a la formación de los lotes de limpieza. Cuando se fabrican más de una pieza, cada una es introducida en la cinta 945 segundos después de la anterior, 113 segundos antes de que el robot posicione la pieza anterior en la cinta tras su fresado. De esta manera la siguiente pieza llega al robot 5 segundos después de esto, tiempo empleado por el robot en el movimiento de soltar una pieza y coger la siguiente. Los tiempos de cada movimiento u operación son los mostrados en la tercera columna de las tablas.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | B | B | B | B | B | B |
|-------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 0 | 945 | 0 | 945 | 1890 |
| Entrada cinta-robot 2 | 11.8 m | 118 s | 0/118 | 0/118 | 945/1063 | 0/118 | 945/1063 | 1890/2008 |
| Robot 2-fresadora 2 | - | 20 s | 118/138 | 118/138 | 1063/1083 | 118/138 | 1063/1083 | 2008/2028 |
| Fresado | - | 15 min | 138/1038 | 138/1038 | 1083/1983 | 138/1038 | 1083/1983 | 2028/2928 |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 1038/1058 | 1038/1058 | 1983/2003 | 1038/1058 | 1983/2003 | 2928/2948 |
| Cinta-robot 2 | 4.9 m | 49 s | 1058/1107 | 1058/1107 | 2003/2052 | 1058/1107 | 2003/2052 | 2948/2997 |
| Robot 2-rectificadora 2 | - | 20 s | 1107/1127 | 1107/1127 | 2052/2072 | 1107/1127 | 2052/2072 | 2997/3017 |
| Rectificado | - | 15 min | 1127/2027 | 1127/2027 | 2072/2972 | 1127/2027 | 2072/2972 | 3017/3917 |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 2027/2047 | 2027/2047 | 2972/2992 | 2027/2047 | 2972/2992 | 3917/3937 |
| Cinta-robot 3 | 3.8 m | 38 s | 2047/2085 | 2047/2085 | 2992/3030 | 2047/2085 | 2992/3030 | 3937/3975 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2085/2105 | 2085/2105 | 3030/3050 | 2085/2105 | 3030/3050 | 3975/3995 |
| Verificación | - | 10 min | 2105/2705 | 2105/2705 | 3050/3650 | 2105/2705 | 3050/3650 | 3995/4595 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 2705/2725 | 2705/2725 | 3650/3670 | 2705/2725 | 3650/3670 | 4595/4615 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2725/2755 | 2725/2755 | 3670/3700 | 2725/2755 | 3670/3700 | 4615/4645 |
| Espera lote | | | - | 2755/3700 | - | 2755/4645 | 3700/4645 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 2755/2775 | 3700/3720 | 3700/3720 | 4645/4665 | 4645/4665 | 4645/4665 |
| Limpieza | - | 20 min | 2775/3975 | 3720/4920 | 3720/4920 | 4665/5865 | 4665/5865 | 4665/5865 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 3975/4275 | 4920/5220 | 4920/5220 | 5865/6165 | 5865/6165 | 5865/6165 |
| | | | Un lote | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 12. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, para fabricar una sola pieza de tipo B, son necesarios **4275 segundos** (1 h 11 min 20 s); cuando se fabrican dos, **5220 segundos** (1 h 27 min); cuando se fabrican tres, **6165 segundos** (1 h 42 min 45 s); y cuando son cuatro, **7110 segundos** (1 h 58 min 30 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | B | B | B | B |
|-------------------------------|----------|---------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 945 | 1890 | 2835 |
| Entrada cinta-robot 2 | 11.8 m | 118 s | 0/118 | 945/1063 | 1890/2008 | 2835/2953 |
| Robot 2-fresadora 2 | - | 20 s | 118/138 | 1063/1083 | 2008/2028 | 2953/2973 |
| Fresado | - | 15 min | 138/1038 | 1083/1983 | 2028/2928 | 2973/3873 |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 1038/1058 | 1983/2003 | 2928/2948 | 3873/3893 |
| Cinta-robot 2 | 4.9 m | 49 s | 1058/1107 | 2003/2052 | 2948/2997 | 3893/3942 |
| Robot 2-rectificadora 2 | - | 20 s | 1107/1127 | 2052/2072 | 2997/3017 | 3942/3962 |
| Rectificado | - | 15 min | 1127/2027 | 2072/2972 | 3017/3917 | 3962/4862 |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | - | 20 s | 2027/2047 | 2972/2992 | 3917/3937 | 4862/4882 |
| Cinta-robot 3 | 3.8 m | 38 s | 2047/2085 | 2992/3030 | 3937/3975 | 4882/4920 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2085/2105 | 3030/3050 | 3975/3995 | 4920/4940 |
| Verificación | - | 10 min | 2105/2705 | 3050/3650 | 3995/4595 | 4940/5540 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 2705/2725 | 3650/3670 | 4595/4615 | 5540/5560 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 2725/2755 | 3670/3700 | 4615/4645 | 5560/5590 |
| Espera lote | | | 2755/3700 | - | 4645/5590 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3700/3720 | 3700/3720 | 5590/5610 | 5590/5610 |
| Limpieza | - | 20 min | 3720/4920 | 3720/4920 | 5610/6810 | 5610/6810 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4920/5220 | 4920/5220 | 6810/7110 | 6810/7110 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 13. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

Hasta ahora se han expuesto los tiempos de fabricación de todas las combinaciones formadas por piezas de un mismo tipo, por lo que las combinaciones restantes se componen de piezas de ambos tipos. Se emplean ambas

fresadoras y ambas rectificadoras, cada una para el tipo de pieza que mecaniza habitualmente. Ello conlleva la formación de esperas a la entrada de la máquina de medición de coordenadas.

En las tablas A.14 y A.15 se detalla la fabricación de las combinaciones restantes de volver a producir dos y tres piezas. Al anotarse los tiempos de fabricación de piezas de distinto tipo en una misma tabla, en la segunda y tercera columnas se han anotado la longitud de los desplazamientos y el tiempo de cada operación para ambos tipos de piezas, separados mediante una barra. De esta manera, el número de la izquierda corresponde a los desplazamientos y tiempos de las piezas de tipo A, y el de la derecha, a los de las piezas de tipo B.

En la tabla A.14 se reflejan los tiempos de tener que fabricar nuevamente dos piezas, una de cada tipo, y tres piezas, una de tipo A y dos de tipo B. En la tabla A.15 se especifica la fabricación de dos piezas de tipo A y una de tipo B.

La fabricación de una pieza de cada tipo es muy similar a la que se detalló en las tablas 5.1 y 5.2 para las piezas A1 y B1. La única diferencia es que el tiempo de espera de las piezas para formar un lote a la entrada de la máquina de limpieza es menor, ya que son dos piezas y no tres las que componen dicho lote.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A | B | B |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 5 | 0 | 5 | 950 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/11.8 m | 28/118 s | 0/28 | 5/123 | 0/28 | 5/123 | 950/1068 |
| Robot -fresadora | - | 20 s | 28/48 | 123/143 | 28/48 | 123/143 | 1068/1088 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 143/1043 | 48/1248 | 143/1043 | 1088/1988 |
| Fresadora-robot -cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1043/1063 | 1248/1268 | 1043/1063 | 1988/2008 |
| Cinta-robot | 5/4.9 m | 50/49 s | 1268/1318 | 1063/1112 | 1268/1318 | 1063/1112 | 2008/2057 |
| Robot -rectificadora | - | 20 s | 1318/1338 | 1112/1132 | 1318/1338 | 1112/1132 | 2057/2077 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1132/2032 | 1338/2238 | 1132/2032 | 2077/2977 |
| Rectificadora-robot-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2032/2052 | 2238/2258 | 2032/2052 | 2977/2997 |
| Cinta-robot 3 | 12.8/3.8 m | 128/38 s | 2258/2386 | 2052/2090 | 2258/2386 | 2052/2090 | 2997/3035 |
| Espera - | - | - | 2386/2730 | - | 2386/2730 | - | 3035/3370 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 2090/2110 | 2730/2750 | 2090/2110 | 3370/3390 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 2110/2710 | 2750/3350 | 2110/2710 | 3390/3990 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 2710/2730 | 3350/3370 | 2710/2730 | 3990/4010 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 2730/2760 | 3370/3400 | 2730/2760 | 4010/4040 |
| Espera lote | | | - | 2760/3400 | 3400/4040 | 2760/4040 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3400/3420 | 3400/3420 | 4040/4060 | 4040/4060 | 4040/4060 |
| Limpieza | - | 20 min | 3420/4620 | 3420/4620 | 4060/5260 | 4060/5260 | 4060/5260 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4620/4920 | 4620/4920 | 5260/5560 | 5260/5560 | 5260/5560 |
| | | | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 14. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AB o ABB en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma el tocho A, una vez colocado en la cinta, es introducido por el robot en la *fresadora 1*, mientras que 5 segundos después de colocar el tocho A en la cinta, se introduce el tocho B, el cual se dirige por la cinta hasta llegar al *robot 2* que lo introduce en la *fresadora 2*. Tras finalizar el fresado de la pieza B en el segundo 1043, que termina antes que el de la pieza A, comienza el rectificado de la misma en la *rectificadora 2*. De igual forma, al acabar el fresado de la pieza A, el *robot 1* la introduce en la *rectificadora 1*. La primera pieza en llegar a la máquina de medición de coordenadas es la pieza de tipo B, que se introduce en dicha máquina en el segundo 2110 y se saca y se coloca de nuevo en la cinta en el segundo 2730. Una vez verificada la pieza de tipo B, es colocada por el *operario 3* en el estante junto a la máquina de limpieza, a la espera de que finalice la verificación de la pieza de tipo A. El tiempo de espera de la pieza B en el estante es de 640 segundos. Una vez verificadas ambas piezas, se desplazan desde el estante hasta la máquina de limpieza en la que se introducen simultáneamente en el segundo 3420. Finalizado el proceso, se dejan secar sobre el estante de piezas terminadas. Por tanto, son necesarios **4920 segundos** (1 h 22 min) para la fabricación de estas dos piezas.

Otra de las combinaciones posibles a volver a fabricar está formada por dos piezas de tipo B y una de tipo A, que es muy similar al caso anterior. Únicamente se debería introducir un nuevo tocho de tipo B en la cinta. Dicho tocho se introduce, 113 segundos antes de que el robot posicione la primera pieza de tipo B fresada nuevamente en la cinta, es decir, en el segundo 950. La segunda pieza de tipo B, una vez fresada y rectificadora, debe esperar a que la pieza A concluya el proceso de verificación, esperando un total de 335 segundos. Una vez en posicionadas en el estante anterior a la máquina de limpieza, la primera pieza de tipo B, espera 1280 segundos,

y la pieza A, 640 segundos, a la segunda pieza de tipo B para ser limpiadas. El tiempo de fabricación para este lote es de **5560 segundos** (1 h 32 min 40 s).

Si, por el contrario, se han de fabricar dos piezas de tipo A y una de tipo B (tabla A.15), el proceso es similar al anterior, pero esta vez se introduce una segunda pieza de tipo A. Dicha pieza se introduce 23 segundos antes de que el robot 1 posicione la primera pieza de tipo A fresada nuevamente en la cinta, es decir, en el segundo 1245. En este caso, tras el fresado y rectificado, la segunda pieza de tipo A se introduce en la máquina de medición de coordenadas sin tener que esperar a que la pieza anterior finalice la verificación. Todo el proceso restante es similar al de los casos anteriores y el tiempo de fabricación es de **5821 segundos** (1 h 37 min 1 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 5 | 1245 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/11.8 m | 28/118 s | 0/28 | 5/123 | 1245/1273 |
| Robot-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 123/143 | 1273/1293 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 143/1043 | 1293/2493 |
| Fresadora-robot-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1043/1063 | 2493/2513 |
| Cinta-robot | 5/4.9 m | 50/49 s | 1268/1318 | 1063/1112 | 2513/2563 |
| Robot-rectificadora | - | 20 s | 1318/1338 | 1112/1132 | 2563/2583 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1132/2032 | 2583/3483 |
| Rectificadora-robot-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2032/2052 | 3483/3503 |
| Cinta-robot 3 | 12.8/3.8 m | 128/38 s | 2258/2386 | 2052/2090 | 3503/3631 |
| Espera | - | - | 2386/2730 | - | - |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 2090/2110 | 3631/3651 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 2110/2710 | 3651/4251 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 2710/2730 | 4251/4271 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 2730/2760 | 4271/4301 |
| Espera lote | | | 3400/4301 | 2760/4301 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 4301/4321 | 4301/4321 | 4301/4321 |
| Limpieza | - | 20 min | 4321/5521 | 4321/5521 | 4321/5521 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 5521/5821 | 5521/5821 | 5521/5821 |
| Un lote | | | | | |

Tabla A. 15. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA en la célula de la alternativa 1.
Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes tablas, A.16, A.17 y A.18, se anotan los tiempos de fabricación en los casos que deban fabricarse lotes de cuatro piezas de ambos tipos.

En la tabla A.16 se muestra la combinación de dos piezas de tipo A y dos piezas de tipo B, cuyo proceso de fabricación es muy similar al de las piezas A1, B1, A2 y B2, de las tablas 5.1 y 5.2. Son necesarios **6200 segundos**, 1 hora, 43 minutos y 20 segundos, para su fabricación.

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | B | A |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 5 | 950 | 1245 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/11.8 m | 28/118 s | 0/28 | 5/123 | 950/1068 | 1245/1273 |
| Robot-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 123/143 | 1068/1088 | 1273/1293 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 143/1043 | 1088/1988 | 1293/2493 |
| Fresadora-robot-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1043/1063 | 1988/2008 | 2493/2513 |
| Cinta-robot | 5/4.9 m | 50/49 s | 1268/1318 | 1063/1112 | 2008/2057 | 2513/2563 |
| Robot-rectificadora | - | 20 s | 1318/1338 | 1112/1132 | 2057/2077 | 2563/2583 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1132/2032 | 2077/2977 | 2583/3483 |
| Rectificadora-robot-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2032/2052 | 2977/2997 | 3483/3503 |
| Cinta-robot | 12.8/3.8 m | 128/38 s | 2258/2386 | 2052/2090 | 2997/3035 | 3503/3631 |
| Espera | | | 2386/2730 | - | 3035/3370 | 3631/4010 |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 2090/2110 | 3370/3390 | 4010/4030 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 2110/2710 | 3390/3990 | 4030/4630 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 2710/2730 | 3990/4010 | 4630/4650 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 2730/2760 | 4010/4040 | 4650/4680 |
| Espera lote | | | - | 2760/3400 | 4040/6200 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3400/3420 | 3400/3420 | 4680/4700 | 4680/4700 |
| Limpieza | - | 20 min | 3420/4620 | 3420/4620 | 4700/5900 | 4700/5900 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4620/4920 | 4620/4920 | 5900/6200 | 5900/6200 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 16. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBA en la célula de la alternativa 1.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla A.17 se detallan los tiempos de los procesos y movimientos de piezas durante la fabricación de tres piezas de tipo A y una pieza de tipo B. La fabricación de esta secuencia de piezas es muy similar a la mostrada en la tabla A.15, con la diferencia de que se introduce una cuarta pieza, cambiando así los tiempos de espera de las mismas en la formación de los lotes de limpieza. El cuarto tocho, de tipo A, se introduce en la cinta en el segundo 2490 y va pasando por la *fresadora 1*, la *rectificadora 1* y la máquina de medición de coordenadas sin esperas de ningún tipo. La pieza anterior a ella, debe esperar 1245 segundos hasta que la última pieza llegue al estante de piezas verificadas y puedan introducirse simultáneamente en la máquina de limpieza. El tiempo de fabricación de esta combinación es de **7066 segundos** (1 h 57 min 46 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | A | A |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 5 | 1245 | 2490 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/11.8 m | 28/118 s | 0/28 | 5/123 | 1245/1273 | 2490/2518 |
| Robot -fresadora | - | 20 s | 28/48 | 123/143 | 1273/1293 | 2518/2538 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 143/1043 | 1293/2493 | 2538/3738 |
| Fresadora-robot -cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1043/1063 | 2493/2513 | 3738/3758 |
| Cinta-robot | 5/4.9 m | 50/49 s | 1268/1318 | 1063/1112 | 2513/2563 | 3758/3808 |
| Robot-rectificadora | - | 20 s | 1318/1338 | 1112/1132 | 2563/2583 | 3808/3828 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1132/2032 | 2583/3483 | 3828/4728 |
| Rectificadora-robot-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2032/2052 | 3483/3503 | 4728/4748 |
| Cinta-robot | 12.8/3.8 m | 128/38 s | 2258/2386 | 2052/2090 | 3503/3631 | 4748/4876 |
| Espera | | | 2386/2730 | - | - | - |
| Robot 3-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 2090/2110 | 3631/3651 | 4876/4896 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 2110/2710 | 3651/4251 | 4896/5496 |
| MMC-robot 3-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 2710/2730 | 4251/4271 | 5496/5516 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 2730/2760 | 4271/4301 | 5516/5546 |
| Espera lote | | | - | 2760/3400 | 4301/5546 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3400/3420 | 3400/3420 | 5546/5566 | 5546/5566 |
| Limpieza | - | 20 min | 3420/4620 | 3420/4620 | 5566/6766 | 5566/6766 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4620/4920 | 4620/4920 | 6766/7066 | 6766/7066 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 17. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla A.18 la fabricación de una pieza de tipo A y tres de tipo B. Los tiempos de fabricación de la primera pieza de cada tipo son completamente iguales a los del caso anterior. El tercer y cuarto tocho de esta combinación se introducen en la cinta en los segundos 950 y 1895, respectivamente. Ambos esperan, el tiempo necesario para que la pieza anterior termine su verificación y sea colocada en la cinta, para poder ser colocados por el robot en dicha máquina. Tras concluir este proceso, se introducen en la máquina de limpieza simultáneamente. El tiempo final de fabricación de estas 4 piezas es también de **6200 segundos** (1 h 43 min 20 s).

| Movimiento/proceso | Desplaz. | Tiempos | A | B | B | B |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-cinta | | - | 0 | 5 | 950 | 1895 |
| Entrada cinta-robot | 2.75/11.8 m | 28/118 s | 0/28 | 5/123 | 950/1068 | 1895/2013 |
| Robot 1-fresadora | - | 20 s | 28/48 | 123/143 | 1068/1088 | 2013/2033 |
| Fresado | - | 20/15 min | 48/1248 | 143/1043 | 1088/1988 | 2033/2933 |
| Fresadora-robot 1-cinta | - | 20 s | 1248/1268 | 1043/1063 | 1988/2008 | 2933/2953 |
| Cinta-robot 2 | 5/4.9 m | 50/49 s | 1268/1318 | 1063/1112 | 2008/2057 | 2953/3002 |
| Robot 2-rectificadora | - | 20 s | 1318/1338 | 1112/1132 | 2057/2077 | 3002/3022 |
| Rectificado | - | 15 min | 1338/2238 | 1132/2032 | 2077/2977 | 3022/3922 |
| Rectificadora-robot 2-cinta | - | 20 s | 2238/2258 | 2032/2052 | 2977/2997 | 3922/3942 |
| Cinta-robot 2 | 12.8/3.8 m | 128/38 s | 2258/2386 | 2052/2090 | 2997/3035 | 3942/3980 |
| Espera | | | 2386/2730 | - | 3035/3370 | 3890/4010 |
| Robot 2-MMC | - | 20 s | 2730/2750 | 2090/2110 | 3370/3390 | 4010/4030 |
| Verificación | - | 10 min | 2750/3350 | 2110/2710 | 3390/3990 | 4030/4630 |
| MMC-robot-cinta | - | 20 s | 3350/3370 | 2710/2730 | 3990/4010 | 4630/4650 |
| Cinta-operario | 3 m | 30 s | 3370/3400 | 2730/2760 | 4010/4040 | 4650/4680 |
| Espera lote | | | - | 2760/3400 | 4040/4680 | - |
| Estante-máquina de limpieza | | 20 s | 3400/3420 | 3400/3420 | 4680/4700 | 4680/4700 |
| Limpieza | - | 20 min | 3420/4620 | 3420/4620 | 4700/5900 | 4700/5900 |
| Máq. limpieza-secado-estante | | 5 min | 4620/4920 | 4620/4920 | 5900/6200 | 5900/6200 |
| | | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 18. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB en la célula de la alternativa 1.

Fuente: Elaboración propia.

A.3. Alternativa 2

Al igual que en la disposición anterior, en la célula basada en un layout centrado en robots propuesta como *alternativa 2* [subsección 5.1.2] a la situación inicial, también se producen piezas defectuosas con una determinada frecuencia. A continuación se detallan los tiempos de fabricación correspondientes a las distintas secuencias de piezas que se requieran fabricar. El método empleado para el cálculo de los tiempos es similar al usado en las tablas 5.13 y 5.14, en las que se detalla el proceso de fabricación ideal, sin sobreprocesamiento, de esta segunda alternativa.

En la tabla A.19 se muestran los tiempos de fabricación necesarios para volver a producir una, dos o tres piezas de tipo A. Al igual que en la célula de la situación inicial y en la célula con duplicación de maquinaria, cuando la secuencia completa de piezas a fabricar es de un solo tipo, A o B, sólo se emplea la fresadora correspondiente al tipo de pieza que tenga asociado.

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | A | A | A | A | A |
|---------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 0 | 1250 | 0 | 1250 | 2500 |
| Estante TA-fresadora 1 | 20 s | 0/20 | 0/20 | 1250/1270 | 0/20 | 1250/1270 | 2500/2520 |
| Fresado | 20 min | 20/1220 | 20/1220 | 1270/2470 | 20/1220 | 1270/2470 | 2520/3720 |
| Fresadora 1- estante PF | 20 s | 1220/1240 | 1220/1240 | 2470/2490 | 1220/1240 | 2470/2490 | 3720/3740 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 1240/1260 | 1240/1260 | 2490/2510 | 1240/1260 | 2490/2510 | 3740/3760 |
| Rectificado | 15 min | 1260/2160 | 1260/2160 | 2510/3410 | 1260/2160 | 2510/3410 | 3760/4660 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2160/2180 | 2160/2180 | 3410/3430 | 2160/2180 | 3410/3430 | 4660/4680 |
| Verificación | 10 min | 2180/2780 | 2180/2780 | 3430/4030 | 2180/2780 | 3430/4030 | 4680/5280 |
| MMC-estante PL | 20 s | 2780/2800 | 2780/2800 | 4030/4050 | 2780/2800 | 4030/4050 | 5280/5300 |
| Espera lote | - | - | 2800/4050 | - | 2800/5300 | 4050/5300 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 2800/2820 | 4050/4070 | 4050/4070 | 5300/5320 | 5300/5320 | 5300/5320 |
| Limpieza | 20 min | 2820/4020 | 4070/5270 | 4070/5270 | 5320/6520 | 5320/6520 | 5320/6520 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 4020/4320 | 5270/5570 | 5270/5570 | 6520/6820 | 6520/6820 | 6520/6820 |
| | | Un lote | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 19. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea A, AA o AAA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Para volver a fabricar una pieza de tipo A se precisan **4320 segundos** (1 h 12 min) adicionales. La fabricación se inicia en el instante en el que el robot toma el tocho de tipo A del estante TA y lo introduce en la *fresadora 1*, tardando en ello 20 segundos. Tras 20 minutos de fresado y 20 segundos que el *robot 1* emplea en el movimiento, coloca la pieza en el estante de piezas fresadas, PF, en el segundo 1240. Seguidamente, el *robot 2* coge la pieza y la introduce en la rectificadora. Tras el rectificado, el *robot 2* emplea 20 segundos en sacar la pieza de dicha máquina e introducirla en la máquina de medición de coordenadas. Una vez finalizada la verificación de la pieza, ésta es colocada por el mismo robot en el estante PL, pasados 2800 segundos desde el inicio de la fabricación. En ese mismo instante el operario encargado de la limpieza de las piezas, la recoge del estante PL y la introduce junto con la solución de limpieza en la máquina, en el instante 2820. Tras 20 minutos, el operario la saca de la máquina y la deja secar durante 5 minutos antes de colocarla en el estante de piezas terminadas.

La fabricación de dos y tres piezas de tipo A, es similar a la de una única pieza. Tras el fresado de la primera pieza, y tal y como se detalló en las tablas 5.13 y 5.14, la segunda y la tercera pieza son tomadas por el *robot 1* del estante de tochos de tipo A, TA, 10 segundos después de que el robot haya colocado la pieza anterior en el estante PF, que es el tiempo que el robot requiere en ir desde dicho estante al de tochos. De esta forma, si el robot posiciona la primera pieza en el estante PF en el segundo 1240, es en el 1250 cuando el robot recoge la siguiente pieza de estante TA para introducirlo en la *fresadora 1*. Lo mismo ocurre con la tercera pieza de la secuencia AAA. El proceso de fabricación posterior es similar al descrito para el caso de una única pieza de tipo A. El único tiempo de espera se produce durante la formación del lote de piezas para ser limpiadas. Cada pieza permanece 1250 segundos en el estante por cada pieza que tiene que esperar para completar el lote. Esto significa que si el lote está formado por tres piezas, la primera pieza en llegar al estante PL debe esperar 2500 segundos, mientras que la segunda espera 1250. Por tanto, fabricar nuevamente dos piezas de tipo A conlleva un tiempo adicional de **5570 segundos** (1 h 32 min 50 s) y 3 piezas, **6820 segundos** (1 h 53 min 40 s).

La producción de cuatro piezas de tipo A se muestra en la tabla A.20 y es muy similar a los casos anteriores, existiendo diferencias en la formación de lotes de limpieza. Al ser cuatro piezas las que han de fabricarse y tres

el máximo de piezas que pueden introducirse simultáneamente en la máquina de limpieza, se forman dos lotes de dos piezas cada uno. El tiempo total de fabricación de cuatro piezas de tipo A es de **8070 segundos** (2 h 14 min 30 s).

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | A | A | A |
|---------------------------------|---------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 1250 | 2500 | 3750 |
| Estante TA-fresadora 1 | 20 s | 0/20 | 1250/1270 | 2500/2520 | 3750/3770 |
| Fresado | 20 min | 20/1220 | 1270/2470 | 2520/3720 | 3770/4970 |
| Fresadora 1- estante PF | 20 s | 1220/1240 | 2470/2490 | 3720/3740 | 4970/4990 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 1240/1260 | 2490/2510 | 3740/3760 | 4990/5010 |
| Rectificado | 15 min | 1260/2160 | 2510/3410 | 3760/4660 | 5010/5910 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2160/2180 | 3410/3430 | 4660/4680 | 5910/5930 |
| Verificación | 10 min | 2180/2780 | 3430/4030 | 4680/5280 | 5930/6530 |
| MMC-estante PL | 20 s | 2780/2800 | 4030/4050 | 5280/5300 | 6530/6550 |
| Espera lote | - | 2800/4050 | - | 5300/6550 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 4050/4070 | 4050/4070 | 6550/6570 | 6550/6570 |
| Limpieza | 20 min | 4070/5270 | 4070/5270 | 6570/7770 | 6570/7770 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 5270/5570 | 5270/5570 | 7770/8070 | 7770/8070 |
| | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 20. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AAAA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas A.21 y A.22 se muestran los tiempos asociados a la fabricación de una, dos, tres y cuatro piezas de tipo B. En este caso, solo se emplea la *fresadora 2* para el fresado de las piezas y los tochos se toman del estante TB. Las únicas esperas que se producen son las asociadas a la formación de los lotes de limpieza. Por tanto, para fabricar una sola pieza de tipo B, son necesarios **4050 segundos** (1 h 7 min 30 s); cuando se fabrican dos, **5000 segundos** (1 h 23 min 20 s); cuando se fabrican tres, **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s); y cuando son cuatro, **6900 segundos** (1 h 55 min).

| Movimiento/proceso | Tiempos | B | B | B | B | B | B |
|---------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 30 | 30 | 980 | 30 | 980 | 1930 |
| Estante TB-fresadora 2 | 20 s | 30/50 | 30/50 | 980/1000 | 30/50 | 980/1000 | 1930/1950 |
| Fresado | 15 min | 50/950 | 50/950 | 1000/1900 | 50/950 | 1000/1900 | 1950/2850 |
| Fresadora 2-estante PF | 20 s | 950/970 | 950/970 | 1900/1920 | 950/970 | 1900/1920 | 2850/2870 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 970/990 | 970/990 | 1920/1940 | 970/990 | 1920/1940 | 2870/2890 |
| Rectificado | 15 min | 990/1890 | 990/1890 | 1940/2840 | 990/1890 | 1940/2840 | 2890/3790 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 1890/1910 | 1890/1910 | 2840/2860 | 1890/1910 | 2840/2860 | 3790/3810 |
| Verificación | 10 min | 1910/2510 | 1910/2510 | 2860/3460 | 1910/2510 | 2860/3460 | 3810/4410 |
| MMC-estante PL | 20 s | 2510/2530 | 2510/2530 | 3460/3480 | 2510/2530 | 3460/3480 | 4410/4430 |
| Espera lote | - | - | 2530/3480 | - | 2530/4430 | 3480/4430 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 2530/2550 | 3480/3500 | 3480/3500 | 4430/4450 | 4430/4450 | 4430/4450 |
| Limpieza | 20 min | 2550/3750 | 3500/4700 | 3500/4700 | 4450/5650 | 4450/5650 | 4450/5650 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 3750/4050 | 4700/5000 | 4700/5000 | 5650/5950 | 5650/5950 | 5650/5950 |
| | | Un lote | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 21. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea B, BB o BBB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

| Movimiento/proceso | Tiempos | B | B | B | B |
|---------------------------------|---------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 30 | 980 | 1930 | 2880 |
| Estante TB-fresadora 2 | 20 s | 30/50 | 980/1000 | 1930/1950 | 2880/2900 |
| Fresado | 15 min | 50/950 | 1000/1900 | 1950/2850 | 2900/3800 |
| Fresadora 2-estante PF | 20 s | 950/970 | 1900/1920 | 2850/2870 | 3800/3820 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 970/990 | 1920/1940 | 2870/2890 | 3820/3840 |
| Rectificado | 15 min | 990/1890 | 1940/2840 | 2890/3790 | 3840/4740 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 1890/1910 | 2840/2860 | 3790/3810 | 4740/4760 |
| Verificación | 10 min | 1910/2510 | 2860/3460 | 3810/4410 | 4760/5360 |
| MMC-estante PL | 20 s | 2510/2530 | 3460/3480 | 4410/4430 | 5360/5380 |
| Espera lote | - | 2530/3480 | - | 4430/5380 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 3480/3500 | 3480/3500 | 5380/5400 | 5380/5400 |
| Limpieza | 20 min | 3500/4700 | 3500/4700 | 5400/6600 | 5400/6600 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 4700/5000 | 4700/5000 | 6600/6900 | 6600/6900 |
| | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 22. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea BBBB en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

Hasta el momento se han expuesto los tiempos de fabricación de todas las combinaciones formadas por piezas de un mismo tipo, por lo que las combinaciones restantes se componen de piezas de ambos tipos. Se emplean ambas fresadoras, cada una para el tipo de pieza que mecaniza habitualmente. Ello conlleva la formación de esperas en el estante de piezas fresadas, antes del rectificado, al igual que en la situación ideal de fabricación.

En las tablas A.23 y A.24 se detalla la fabricación de las combinaciones restantes de volver a producir dos y tres piezas. Al anotarse los tiempos de fabricación de piezas de distinto tipo en una misma tabla, en la segunda y tercera columnas se ha anotado el tiempo de cada operación para ambos tipos de piezas, separados mediante una barra. El número de la izquierda corresponde al tiempo de las piezas de tipo A, y el de la derecha, al de las piezas de tipo B.

En la tabla A.23 se reflejan los tiempos de tener que fabricar nuevamente dos piezas, una de cada tipo, y tres piezas, una de tipo A y dos de tipo B. En la tabla A.24 se especifica la fabricación de dos piezas de tipo A y una de tipo B.

La fabricación de una pieza de cada tipo es muy similar a la que se detalló en las tablas 5.13 y 5.14 para las piezas A1 y B1. La única diferencia es que el tiempo de espera de las piezas para formar un lote a la entrada de la máquina de limpieza es menor, ya que son dos piezas y no tres las que componen dicho lote.

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | B | A | B | B |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 30 | 0 | 30 | 980 |
| Estante TA/TB –fresadora 1/2 | 20 s | 0/20 | 30/50 | 0/20 | 30/50 | 980/1000 |
| Fresado | 20/15 min | 20/1220 | 50/950 | 20/1220 | 50/950 | 1000/1900 |
| Fresadora 1/2-estante PF | 20 s | 1220/1240 | 950/970 | 1220/1240 | 950/970 | 1900/1920 |
| Espera en estante PF | - | 1240/1920 | - | 1240/1920 | - | 1920/2870 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 970/990 | 1920/1940 | 970/990 | 2870/2890 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 990/1890 | 1940/2840 | 990/1890 | 2890/3790 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 1890/1910 | 2840/2860 | 1890/1910 | 3790/3810 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 1910/2510 | 2860/3460 | 1910/2510 | 3810/4410 |
| MMC-estante PL | 20 s | 3460/3480 | 2510/2530 | 3460/3480 | 2510/2530 | 4410/4430 |
| Espera lote | - | - | 2530/3480 | 3480/4430 | 2530/4430 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 3480/3500 | 3480/3500 | 4430/4450 | 4430/4450 | 4430/4450 |
| Limpieza | 20 min | 3500/4700 | 3500/4700 | 4450/5650 | 4450/5650 | 4450/5650 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 4700/5000 | 4700/5000 | 5650/5950 | 5650/5950 | 5650/5950 |
| | | Un lote | | Un lote | | |

Tabla A. 23. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea AB o ABB en la célula de la alternativa 2.

Fuente: Elaboración propia.

El *robot 1*, tras introducir el tocho de tipo A en la *fresadora 1* en el segundo 20, se dirige hasta el estante de tochos de tipo B, para lo que requiere de 10 segundos, e introduce este último en la *fresadora 2*, en el segundo 30. Una vez terminado el fresado de la pieza de tipo B ésta es colocada en el estante de piezas fresadas en el segundo 970, instante en el que el *robot 2* la coge y la posiciona en la rectificadora. De igual forma, tras finalizar el fresado de la pieza de tipo A, ésta se coloca en el estante PF donde pasará un tiempo, 680 segundos, antes de que el *robot 2* la coloque en la rectificadora. Este tiempo de espera es el necesario para que la pieza B acabe el rectificado, sea colocada en la máquina de medición de coordenadas y el robot llegue hasta el estante de piezas fresadas. Tras acabar la verificación de sus dimensiones, la pieza B es colocada en el estante PL, en el segundo 2530, a la espera de que la pieza A pase satisfactoriamente la verificación y puedan ser transportadas hasta la máquina de limpieza, en el segundo 3480. Finalizado este proceso, son necesarios **5000 segundos** (1 h 23 min 20 s) para la fabricación de estas dos piezas.

Otra de las combinaciones posibles a volver a fabricar está formada por dos piezas de tipo B y una de tipo A, que es muy similar al caso anterior. Únicamente se debería introducir un nuevo tocho de tipo B en la rectificadora. Dicho tocho es tomado por el *robot 1* en el segundo 980 de estante TB, 10 segundos después de que el robot posicione la pieza anterior en el estante PF. Tras finalizar el fresado de esta tercera pieza, el robot la coloca en el estante PF en el que permanecerá 950 segundos, hasta que el *robot 2* la coloque en la rectificadora. Las operaciones y movimientos siguientes son similares a los de las anteriores piezas. Por tanto, la primera pieza, de tipo B, llega al estante PL en el segundo 2530; la pieza de tipo A lo hace en el 3480, 950 segundos después que la anterior; y la segunda pieza de tipo B, en el segundo 4430, instante en el que el operario las transporta hasta la máquina de limpieza. El tiempo necesario de fabricación para este lote es de **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s).

Si, por el contrario, se han de fabricar dos piezas de tipo A y una de tipo B (tabla A.24), el proceso es similar al anterior, pero esta vez se introduce una segunda pieza de tipo A. Dicha pieza es colocada por el robot 1, 10 segundos después de que éste posicione la pieza anterior, también de tipo A, en el estante PF, es decir, en el segundo 1250. En dicho estante, la pieza debe esperar 380 segundos a que la pieza anterior termine el rectificado. Todo el proceso restante es similar al de los casos anteriores y el tiempo de fabricación es de **5950 segundos** (1 h 39 min 10 s).

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | B | A |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 30 | 1250 |
| Estante TA/TB –fresadora 1/2 | 20 s | 0/20 | 30/50 | 1250/1270 |
| Fresado | 20/15 min | 20/1220 | 50/950 | 1270/2470 |
| Fresadora 1/2-estante PF | 20 s | 1220/1240 | 950/970 | 2470/2490 |
| Espera en estante PF | - | 1240/1920 | - | 2490/2870 |
| Estante PF-rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 970/990 | 2870/2890 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 990/1890 | 2890/3790 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 1890/1910 | 3790/3810 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 1910/2510 | 3810/4410 |
| MMC-estante PL | 20 s | 3460/3480 | 2510/2530 | 4410/4430 |
| Espera lote | - | 3480/4430 | 2530/4430 | - |
| Estante PL-máquina de limpieza | 20 s | 4430/4450 | 4430/4450 | 4430/4450 |
| Limpieza | 20 min | 4450/5650 | 4450/5650 | 4450/5650 |
| Máq. limpieza-secado-estante PT | 5 min | 5650/5950 | 5650/5950 | 5650/5950 |
| Un lote | | | | |

Tabla A. 24. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes tablas, A.25, A.26 y A.27, se anotan los tiempos de fabricación en los casos que deban fabricarse lotes de cuatro piezas de ambos tipos.

En la tabla A.25 se muestra la combinación de dos piezas de tipo A y dos piezas de tipo B, cuyo proceso de fabricación es muy similar al de las piezas A1, B1, A2 y B2, de las tablas 5.13 y 5.14. La principal diferencia es la formación de lotes para la limpieza y los tiempos de espera asociados a dicho proceso. En esta situación la secuencia de entrada de las piezas es ABBA y la de salida de la máquina de verificación, BABA. A la primera pieza de tipo A se le asocia un tiempo de espera en el estante PF de 680 segundos. Tras la verificación de la misma se introduce junto a la primera pieza de tipo B, la cual debe esperar en el estante de piezas verificadas 950 segundos hasta la llegada de la siguiente pieza, en la máquina de limpieza. El tercer tocho, de tipo B, es tomado por el robot 1 en el segundo 980 y tras finalizar este proceso debe esperar un total de 950 segundos para ser rectificada. Por su parte, la cuarta pieza, de tipo A, tras ser fresada, espera 1330 segundos en el estante PF. Finalmente ambas se introducen en la solución de limpieza en el segundo 5400, concluyendo la fabricación de las 4 piezas con la colocación de las mismas en el estante de piezas terminadas, en el segundo **6900**, 1 hora y 55 minutos después de que comenzase la fabricación.

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | B | B | A |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 30 | 980 | 1250 |
| Estante 1/2 –fresadora 1/2 | 20 s | 0/20 | 30/50 | 980/1000 | 1250/1270 |
| Fresado | 20/15 min | 20/1220 | 50/950 | 1000/1900 | 1270/2470 |
| Fresadora 1/2-estante 3 | 20 s | 1220/1240 | 950/970 | 1900/1920 | 2470/2490 |
| Espera en estante 3 | - | 1240/1920 | - | 1920/2870 | 2490/3820 |
| Estante 3-rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 970/990 | 2870/2890 | 3820/3840 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 990/1890 | 2890/3790 | 3840/4740 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 1890/1910 | 3790/3810 | 4740/4760 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 1910/2510 | 3810/4410 | 4760/5360 |
| MMC-estante 4 | 20 s | 3460/3480 | 2510/2530 | 4410/4430 | 5360/5380 |
| Espera lote | - | - | 2530/3480 | 4430/5380 | - |
| Estante-máquina de limpieza | 20 s | 3480/3500 | 3480/3500 | 5380/5400 | 5380/5400 |
| Limpieza | 20 min | 3500/4700 | 3500/4700 | 5400/6600 | 5400/6600 |
| Máq. limpieza-secado-estante | 5 min | 4700/5000 | 4700/5000 | 6600/6900 | 6600/6900 |
| | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 25. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBA en la célula de la alternativa 2. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla A.26 se detallan los tiempos de los procesos y movimientos de piezas durante la fabricación de tres piezas de tipo A y una pieza de tipo B. La fabricación de esta secuencia de piezas es muy similar a la mostrada en la tabla A.24, con la diferencia de que se introduce una cuarta pieza, cambiando así los tiempos de espera de las mismas en la formación de los lotes de limpieza. El cuarto tocho, de tipo A, es tomado por el *robot 1* en el segundo 2500 y tras pasar por la *fresadora 1*, permanece 80 segundos en el estante PF antes de ser introducida en la rectificadora. La pieza anterior a ella, debe esperar 950 segundos hasta que la última pieza llegue al estante PL y puedan introducirse simultáneamente en la máquina de limpieza. El tiempo de fabricación de esta combinación es de **6900 segundos** (1 h y 55 min).

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | B | A | A |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 30 | 1250 | 2500 |
| Estante 1/2 –fresadora 1/2 | 20 s | 0/20 | 30/50 | 1250/1270 | 2500/2520 |
| Fresado | 20/15 min | 20/1220 | 50/950 | 1270/2470 | 2520/3720 |
| Fresadora 1/2-estante 3 | 20 s | 1220/1240 | 950/970 | 2470/2490 | 3720/3740 |
| Espera en estante 3 | - | 1240/1920 | - | 2490/2870 | 3740/3820 |
| Estante 3 -rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 970/990 | 2870/2890 | 3820/3840 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 990/1890 | 2890/3790 | 3840/4740 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 1890/1910 | 3790/3810 | 4740/4760 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 1910/2510 | 3810/4410 | 4760/5360 |
| MMC-estante 4 | 20 s | 3460/3480 | 2510/2530 | 4410/4430 | 5360/5380 |
| Espera lote | - | - | 2530/3480 | 4430/5380 | - |
| Estante-máquina de limpieza | 20 s | 3480/3500 | 3480/3500 | 5380/5400 | 5380/5400 |
| Limpieza | 20 min | 3500/4700 | 3500/4700 | 5400/6600 | 5400/6600 |
| Máq. limpieza-secado-estante | 5 min | 4700/5000 | 4700/5000 | 6600/6900 | 6600/6900 |
| | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 26. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABAA en la célula de la alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la tabla A.27 se muestra la fabricación de una pieza de tipo A y tres de tipo B. Los tiempos de fabricación de la primera pieza de cada tipo son completamente iguales a los del caso anterior, obteniéndose el primer lote de piezas limpias 5000 segundos después de iniciar la fabricación. El tercer y cuarto tocho de esta combinación, ambos de tipo B, son tomados por el *robot 1* del estante TB en los segundos 980 y 1930, respectivamente. Ambos esperan, el tiempo necesario para que la pieza anterior termine su rectificado y sea introducida en la máquina de verificación, para poder ser colocada por el robot en la rectificadora. Tras concluir este proceso, ambas piezas se introducen en la máquina de limpieza simultáneamente. El tiempo final de fabricación de estas 4 piezas es también de **6900 segundos** (1 h y 55 min).

| Movimiento/proceso | Tiempos | A | B | B | B |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| Espera-robot 1 | - | 0 | 30 | 980 | 1930 |
| Estante 1/2 –fresadora 1/2 | 20 s | 0/20 | 30/50 | 980/1000 | 1930/1950 |
| Fresado | 20/15 min | 20/1220 | 50/950 | 1000/1900 | 1950/2850 |
| Fresadora 1/2-estante 3 | 20 s | 1220/1240 | 950/970 | 1900/1920 | 2850/2870 |
| Espera en estante 3 | - | 1240/1920 | - | 1920/2870 | 2870/3820 |
| Estante 3 -rectificadora | 20 s | 1920/1940 | 970/990 | 2870/2890 | 3820/3840 |
| Rectificado | 15 min | 1940/2840 | 990/1890 | 2890/3790 | 3840/4740 |
| Rectificadora-MMC | 20 s | 2840/2860 | 1890/1910 | 3790/3810 | 4740/4760 |
| Verificación | 10 min | 2860/3460 | 1910/2510 | 3810/4410 | 4760/5360 |
| MMC-estante 4 | 20 s | 3460/3480 | 2510/2530 | 4410/4430 | 5360/5380 |
| Espera lote | - | - | 2530/3480 | 4430/5380 | - |
| Estante-máquina de limpieza | 20 s | 3480/3500 | 3480/3500 | 5380/5400 | 5380/5400 |
| Limpieza | 20 min | 3500/4700 | 3500/4700 | 5400/6600 | 5400/6600 |
| Máq. limpieza-secado-estante | 5 min | 4700/5000 | 4700/5000 | 6600/6900 | 6600/6900 |
| | | Primer lote | | Segundo lote | |

Tabla A. 27. Tiempo de sobreprocesamiento de piezas cuya secuencia sea ABBB en la célula de la alternativa 2.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B: EQUILIBRADO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

El equilibrado de una línea de producción consiste en la asignación de todas las tareas de un proceso productivo a un conjunto de estaciones de trabajo que conforman dicha línea. Con el equilibrado se consigue maximizar la eficiencia de la producción, ya que minimiza su tiempo de inactividad y minimiza el número de estaciones.

En el problema de equilibrado de línea o ALBP es necesario establecer las relaciones de precedencia, incompatibilidad o afinidad entre las tareas para llevar a cabo la asignación de las mismas a las distintas estaciones de trabajo. El ALBP puede resolverse bien, mediante cálculos sencillos e intuitivos a base de métodos de prueba y error o bien, mediante métodos analíticos. Ciertos métodos analíticos, catalogados como exactos, proporcionan una solución óptima al ALBP, pero poco práctica debido al elevado número de restricciones y variables a considerar. Sin embargo, existen métodos analíticos heurísticos que facilitan una solución aproximada pero eficiente a los problemas reales.

Para resolver el equilibrado de la línea de producción asociada a la célula propuesta como solución final, se va a emplear el método heurístico de *Helgeson & Birnie*. Este método establece una prioridad para la asignación de las tareas a las estaciones mediante unos pesos. El peso de cada tarea es la suma de su tiempo de operación más el de todas las tareas sucesoras. Por ello, para calcular el equilibrado se debe conocer el tiempo de operación de cada tarea, además del tiempo de ciclo y del Takt Time.

Para comenzar con el estudio, es necesario definir tres parámetros de la producción que son imprescindibles para el cálculo del equilibrado de la línea y el empleo del algoritmo de dicho método: el Takt Time, el número mínimo de estaciones y el tiempo muerto.

- Takt Time (TT) o ritmo al cual se debe producir para satisfacer la demanda. Se calcula como el cociente entre el tiempo productivo por turno y la demanda que se debe satisfacer durante ese turno de trabajo. De esta manera se establece que el tiempo productivo durante un turno (TPT) es de 8 horas y la demanda durante dicho turno, de 20 piezas. El Takt Time que se obtiene se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$TT = \frac{TPT}{\text{Demanda Turno}} = \frac{8 \text{ h/turno}}{20 \text{ piezas/turno}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 24 \text{ min/pieza} = \mathbf{1440 \text{ s/pieza}}$$

- Número mínimo de estaciones (NME) en las que se deben agrupar las tareas para la nivelación de la producción. Para el cálculo de este parámetro es necesario listar todas las tareas que se realizan durante el proceso productivo para poder determinar el número de estaciones en la que se van a agrupar, así como el tiempo empleado en realizar cada una de ellas (Tp). La lista de dichas tareas y sus tiempos asociados se muestra en la tabla B.1. El número mínimo de estaciones se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$NME = \frac{\sum_1^{31} T_{pi}}{TT} = \frac{900 + 900 + 1800 + 28 + 20 + 1200 + 20 + 50 + 20 + 900}{1440 \text{ s/pieza}} s + \frac{20 + 128 + 118 + 20 + 900 + 20 + 49 + 20 + 900 + 20 + 38 + 20 + 600 + 20}{1440 \text{ s/pieza}} s + \frac{30 + 20 + 1200 + 300 + 900 + 600 + 2400}{1440 \text{ s/pieza}} s = \frac{14161 \text{ s/pieza}}{1440 \text{ s/pieza}} = 9.83 \cong \mathbf{10}$$

- Tiempo muerto (TM) o diferencia entre el tiempo real invertido y el tiempo necesario para producir.

Definidos estos parámetros y una vez identificadas y secuenciadas todas las tareas, el equilibrado de la línea se calcula siguiendo el *algoritmo de Helgeson & Birnie* que consta de los siguientes pasos:

1. Asignar pesos a cada una de las actividades para poder ordenarlas. El peso de cada tarea se calcula como la suma de los tiempos de operación de todas las actividades posteriores a ella, incluyendo el de la propia tarea.
2. Ordenar las tareas en orden decreciente al peso.
3. Abrir una estación de trabajo cuyo tiempo disponible sea igual al Takt Time.
4. Hasta que no queden tareas:
 - Elegir las tareas candidatas para la estación cuya duración sea menor o igual al tiempo disponible. Las tareas precedentes deben haberse realizado. Si no hay candidatas, volver al paso 3.
 - Seleccionar, entre las candidatas, la de mayor peso.
 - Calcular el nuevo tiempo disponible como el tiempo inicial menos la duración de la tarea seleccionada.

| Tareas | Nº | Tareas predecesora | Tiempo de ejecución | Peso |
|----------------------------------|----|--------------------|---------------------|-------|
| Aprovisionamiento tochos | 1 | - | 15 min (900 s) | 13261 |
| Aprovisionamiento útiles | 2 | - | 15 min (900 s) | 13261 |
| Puesta a punto máquinas | 3 | 1,2 | 30 min (1800 s) | 12361 |
| Entrada cinta-robot 1 | 4 | 3 | 28 s | 8476 |
| Robot 1-fresadora 1 | 5 | 4 | 20 s | 8448 |
| Fresado (piezas tipo A) | 6 | 5 | 20 min (1200 s) | 8428 |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | 7 | 6 | 20 s | 7228 |
| Cinta-robot 1 | 8 | 7 | 50 s | 7208 |
| Robot 1-rectificadora 1 | 9 | 8 | 20 s | 7158 |
| Rectificado (piezas A) | 10 | 9 | 15 min (900 s) | 7138 |
| Rectificadora 1-robot 1-cinta | 11 | 10 | 20 s | 6238 |
| Cinta-robot 3 | 12 | 11 | 128 s | 6218 |
| Entrada cinta-robot 2 | 13 | 3 | 118 s | 8175 |
| Robot 2-fresadora 2 | 14 | 13 | 20 s | 8057 |
| Fresado piezas tipo B | 15 | 14 | 15 min (900 s) | 8037 |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | 16 | 15 | 20 s | 7137 |
| Cinta-robot 2 | 17 | 16 | 49 s | 7117 |
| Robot 2-rectificadora 2 | 18 | 17 | 20 s | 7068 |
| Rectificado (piezas B) | 19 | 18 | 15 min (900 s) | 7048 |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | 20 | 19 | 20 s | 6148 |
| Cinta-robot 3 | 21 | 20 | 38 s | 6128 |
| Robot 3-MMC | 22 | 12, 21 | 20 s | 6090 |
| Verificación | 23 | 22 | 10 min (600 s) | 6070 |
| MMC-robot 3-cinta | 24 | 23 | 20 s | 5470 |
| Cinta-operario | 25 | 24 | 30 s | 5450 |
| Estante-máquina de limpieza | 26 | 25 | 20 s | 5420 |
| Limpieza de piezas | 27 | 26 | 20 min (1200 s) | 5400 |
| Máq. limpieza-secado-estante | 28 | 27 | 5 min (300 s) | 4200 |
| Almacenamiento piezas terminadas | 29 | 28 | 15 min (900 s) | 1500 |
| Devolución de tochos no usados | 30 | 29 | 10 min (600 s) | 600 |
| Limpieza de la célula | 31 | 28 | 40 min (2400 s) | 2400 |

Tabla B.1. Listado de tareas, tiempo de ejecución y el peso asociado según el algoritmo de Helgeson y Birnie. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla B.1 se muestran todas las tareas que forman parte del proceso productivo y que se desean equilibrar, se anotan las tareas predecesoras a cada una de ellas y el tiempo de ejecución necesario para la realización de cada actividad y se calcula el peso según el algoritmo anterior.

Las tareas 1, 2, 3, 29, 30 y 31, mostradas en verde en la tabla anterior, son las tareas exteriores a la célula. Puede observarse que no se han incluido las tareas que no se realizan diariamente, como la recepción de tochos y la limpieza de las máquinas, ni las tareas asociadas únicamente a los casos en los que se producen piezas defectuosas, como el almacenamiento de las piezas que se desechan. Esto es debido a que se desea realizar un equilibrado sencillo, que muestre la situación más frecuente de fabricación. Por otra parte, las tareas mostradas en color naranja, 4-12, hacen referencia a las tareas que se llevan a cabo durante el fresado y el rectificado de las piezas de tipo A, mientras que las tareas 13-21, mostradas en azul, son las asociadas al mecanizado de las piezas de tipo B. Puede observarse que el fresado y el rectificado de las piezas A y B se realiza de forma paralela. Por último las tareas 22-28 corresponden a las operaciones finales de fabricación dentro de la célula: verificación y limpieza.

La secuencia de todas las tareas es la mostrada en la siguiente figura:

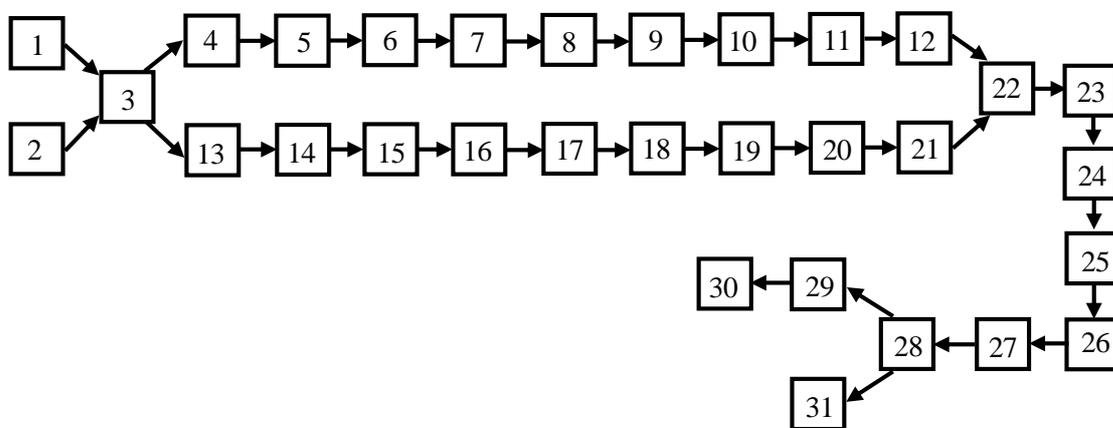


Figura B. 1. Diagrama de secuencia de las tareas registradas en la tabla B.1. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la figura B.2 se muestra la duración de cada tarea antes de realizar el equilibrado de la línea.

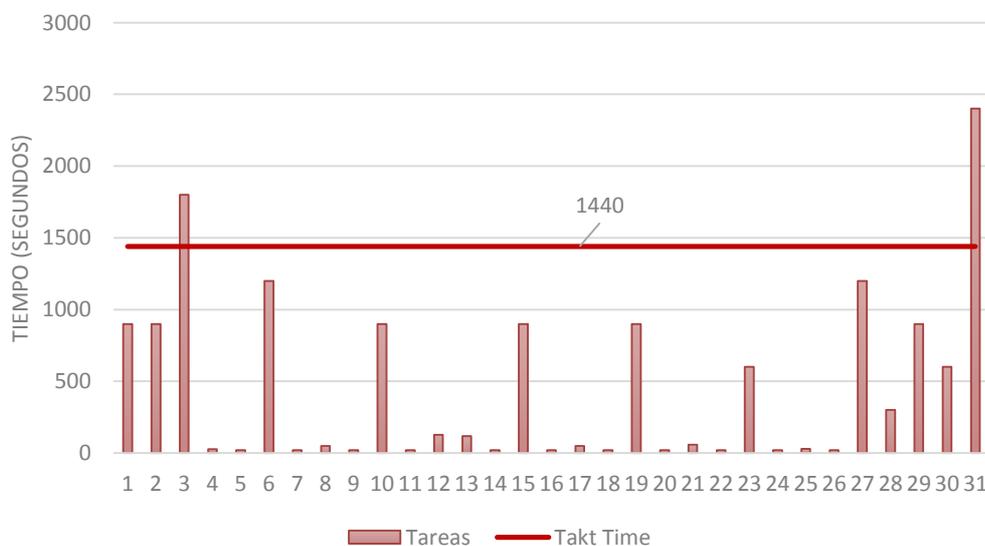


Figura B. 2. Duración de las tareas antes del equilibrado. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al segundo paso del algoritmo, en la tabla B.2 se muestran las tareas ordenadas según el peso.

| Tareas | Nº | Tarea predecesora | Tiempo de ejecución | Peso |
|----------------------------------|----|-------------------|---------------------|-------|
| Aprovisionamiento tochos | 1 | - | 15 min (900 s) | 13261 |
| Aprovisionamiento útiles | 2 | - | 15 min (900 s) | 13261 |
| Puesta a punto máquinas | 3 | 1, 2 | 30 min (1800 s) | 12361 |
| Entrada cinta-robot 1 | 4 | 3 | 28 s | 8476 |
| Robot 1-fresadora 1 | 5 | 4 | 20 s | 8448 |
| Fresado (piezas tipo A) | 6 | 5 | 20 min (1200 s) | 8428 |
| Entrada cinta-robot 2 | 13 | 3 | 118 s | 8175 |
| Robot 2-fresadora 2 | 14 | 13 | 20 s | 8057 |
| Fresado piezas tipo B | 15 | 14 | 15 min (900 s) | 8037 |
| Fresadora 1-robot 1-cinta | 7 | 6 | 20 s | 7228 |
| Cinta-robot 1 | 8 | 7 | 50 s | 7208 |
| Robot 1-rectificadora 1 | 9 | 8 | 20 s | 7158 |
| Rectificado (piezas A) | 10 | 9 | 15 min (900 s) | 7138 |
| Fresadora 2-robot 2-cinta | 16 | 15 | 20 s | 7137 |
| Cinta-robot 2 | 17 | 16 | 49 s | 7117 |
| Robot 2-rectificadora 2 | 18 | 17 | 20 s | 7068 |
| Rectificado (piezas B) | 19 | 18 | 15 min (900 s) | 7048 |
| Rectificadora1-robot 1-cinta | 11 | 10 | 20 s | 6238 |
| Cinta-robot 3 | 12 | 11 | 128s | 6218 |
| Rectificadora 2-robot 2-cinta | 20 | 19 | 20 s | 6148 |
| Cinta-robot 3 | 21 | 20 | 38 s | 6128 |
| Robot 3-MMC | 22 | 12, 21 | 20 s | 6090 |
| Verificación | 23 | 22 | 10 min (600 s) | 6070 |
| MMC-robot 3-cinta | 24 | 23 | 20 s | 5470 |
| Cinta-operario | 25 | 24 | 30 s | 5450 |
| Estante-máquina de limpieza | 26 | 25 | 20 s | 5420 |
| Limpieza de piezas | 27 | 26 | 20 min (1200 s) | 5400 |
| Máq. limpieza-secado-estante | 28 | 27 | 5 min (300 s) | 4200 |
| Limpieza de la célula | 31 | 28 | 40 min (2400 s) | 2400 |
| Almacenamiento piezas terminadas | 29 | 28 | 15 min (900 s) | 1500 |
| Devolución de tochos no usados | 30 | 29 | 10 min (600 s) | 600 |

Tabla B.2. Listado de las tareas ordenadas por el peso. Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de los pasos 3 y 4 del algoritmo se anotan en la tabla B.3 a medida que se desarrolla la explicación de la formación de las estaciones de trabajo. Para los cálculos se hará uso de los datos mostrados en la tabla B.2.

Cada estación dispone de un tiempo de 1440 segundos, igual al Takt Time. Para la primera estación existen dos tareas candidatas, *tarea 1* y *tarea 2*, ambas con el mismo tiempo de operación y el mismo peso, por lo que se puede seleccionar cualquiera de las dos. Arbitrariamente se elige la *tarea 1*, cuyo tiempo de operación de 900 segundos impide que las tareas posteriores, 2 y 3, puedan realizarse en el tiempo restante. Por esta razón se obtiene que la primera estación está formada por la *tarea 1* y tiene un tiempo muerto de 540 segundos. Esto mismo ocurre con la estación 2. En esta estación se elige la *tarea 2* de entre las candidatas, por tener un peso mayor y se cierra con esta tarea, ya que la siguiente no puede realizarse en el tiempo restante. Su tiempo muerto es también de 540 segundos.

La estación 3 posee una única tarea candidata, la *tarea 3*, cuyo tiempo de operación es mayor que el tiempo disponible inicial. En estos casos, se asocia la tarea a la estación y el tiempo muerto que aparece como un número negativo, hace referencia al tiempo adicional a 1440 segundos que haría falta para que dicha tarea pudiese realizarse dentro del Takt Time. Esta misma situación se repite para las estaciones 9, 10 y 11.

Las primeras tareas candidatas para formar parte de la cuarta estación son las tareas 4 y 13, que corresponden a las dos tareas simultáneas que comienzan el mecanizado de las piezas de tipo A y de tipo B. Se elige la *tarea 4* por tener un peso mayor, siendo su duración de 28 segundos. El tiempo disponible para la próxima tarea es, por tanto, el tiempo disponible inicial menos la duración de la tarea 4, 1412 segundos. Del mismo modo se van rellenando las casillas posteriores de la misma estación, identificando

las tareas candidatas de duración igual o inferior al tiempo disponible atendiendo a la preferencia que se estableció en la tabla B.1, eligiendo la de mayor peso y calculando el tiempo disponible que resta para las próximas tareas. Se concluye que en la estación 4 se agrupan las tareas 4, 5, 6, 7, 13 y 14 y hay un tiempo muerto de 34 segundos.

De manera similar, la estación 5 se constituye por las tareas 8, 9, 15, 16, 17 y 18 y tiene un tiempo muerto de 381 segundos, ya que las siguientes tareas candidatas son la número 10 y la 19, con tiempos de ejecución de 900 segundos, superiores al tiempo disponible.

La estación 6 está formada por las tareas 10, 11, 12 y 22 y posee un tiempo muerto de 372 segundos, tiempo insuficiente para realizar la tarea siguiente, la 23, que necesita 600 segundos. La estación 7 se compone de las tareas 19, 20 y 21 y deja un tiempo muerto de 462 segundos. La estación 8 está formada por las tareas 23, 24, 25 y 26 y deja un tiempo muerto de 770 segundos.

Por último, la estación 12 únicamente contiene la tarea 30, que consume 600 segundos del tiempo disponible, dejando 840 segundos de tiempo muerto.

El tiempo trabajado por sección se indica en la última columna de la tabla B.3.

| Estación | Tiempo disponible | Tareas candidatas | Selección de tarea | Tiempo asignado | Tiempo por sección |
|------------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Estación 1 | 1440 | 1 (13261), 2 (13261) | 1 | 900 | 900 |
| TM | 540 (=1440-900) | | | | |
| Estación 2 | 1440 | 2 (13261), 3 (12361) | 2 | 900 | 900 |
| TM | 540 (=1440-900) | | | | |
| Estación 3 | 1440 | 3 | 3 | 1800 | 1800 |
| TM | -360 (=1440-1800) | | | | |
| Estación 4 | 1440 | 4 (8476), 13 (8175) | 4 | 28 | 1406 |
| | 1412 (=1440-28) | 5 (8448), 13 (8175) | 5 | 20 | |
| | 1392 (=1412-20) | 6 (8428), 13 (8175) | 6 | 1200 | |
| | 192 (=1392-1200) | 7 (7228), 13 (8175) | 13 | 118 | |
| | 74 (=192-118) | 7 (7228), 14 (8057) | 14 | 20 | |
| | 54 (=74-20) | 7 (7228) | 7 | 20 | |
| TM | 34 (=54-20) | | | | |
| Estación 5 | 1440 | 8 (7208), 15 (8037) | 15 | 900 | 1059 |
| | 540 (=1440-900) | 8 (7208), 16 (7137) | 8 | 50 | |
| | 490 (=540-50) | 9 (7158), 16 (7137) | 9 | 20 | |
| | 470 (=490-20) | 16 (7137) | 16 | 20 | |
| | 450 (=470-20) | 17 | 17 | 49 | |
| | 401 (=450-49) | 18 | 18 | 20 | |
| TM | 381 (=401-20) | | | | |
| Estación 6 | 1440 | 10 (7138), 19 (7048) | 10 | 900 | 1068 |
| | 540 (=1440-900) | 11 (6238) | 11 | 20 | |
| | 520 (=540-20) | 12 | 12 | 128 | |
| | 353 (=520-128) | 22 | 22 | 20 | |
| TM | 372 (=392-20) | | | | |
| Estación 7 | 1440 | 19 | 19 | 900 | 978 |
| | 540 (=1440-900) | 20 | 20 | 20 | |
| | 520 (=540-20) | 21 | 21 | 58 | |
| TM | 462 (=520-58) | | | | |
| Estación 8 | 1440 | 23 | 23 | 600 | 670 |
| | 840 (=1440-600) | 24 | 24 | 20 | |
| | 820 (=840-20) | 25 | 25 | 30 | |
| | 790 (=820-30) | 26 | 26 | 20 | |
| TM | 770 (790-20) | | | | |
| Estación 9 | 1440 | 27 | 27 | 1200 | 1200 |
| TM | 240 (1140-1200) | | | | |

| | | | | | |
|-------------|-------------------|----------------------|----|------|------|
| Estación 10 | 1440 | 28 | 28 | 300 | 1200 |
| | 1140 (1440-300) | 29 (1500), 31 (2400) | 29 | 900 | |
| TM | 240 (=1140-900) | | | | |
| Estación 11 | 1440 | 30 (600), 31 (2400) | 31 | 2400 | 2400 |
| TM | -960 (=1440-2400) | | | | |
| Estación 12 | 1440 | 30 | 30 | 600 | 600 |
| TM | 840 (=1440-600) | | | | |

Tabla B. 3. Equilibrado de las tareas. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados el número real de estaciones necesarias para agrupar las 31 tareas es 12, dos estaciones más que el número que marcaba el NME. El resultado del agrupamiento de las tareas en dichas estaciones puede visualizarse en la siguiente figura:

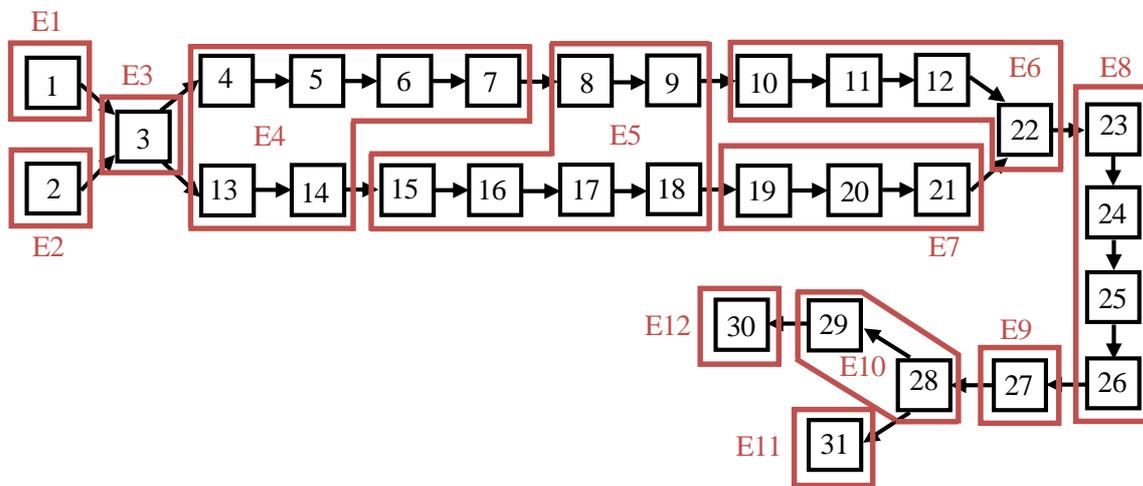


Figura B.3. Diagrama de secuencia de las tareas y su agrupación por estaciones de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el tiempo muerto total de todas las estaciones puede calcularse bien sumando los tiempos muertos de cada estación mostrados en la tabla B.3 o bien, mediante la siguiente expresión:

$$TM = NRE \cdot TT - \sum_1^{31} T_{pi} ,$$

siendo NRE el número real de estaciones obtenidas en el equilibrado, TT el Takt Time o tiempo disponible inicial en cada estación y Tp el tiempo de operación de cada tarea. Operando se obtiene un tiempo muerto de:

$$TM = NE \cdot TT - \sum_1^{31} T_{pi} = 12 \cdot 1440 - 14161 = 3119 s = \mathbf{51 \text{ minutos y } 59 \text{ segundos}}$$

La eficiencia del equilibrado puede calcularse también mediante la siguiente expresión, mediante la que se obtendría la eficiencia ideal:

$$E_I = \frac{\sum_1^{31} T_{pi}}{T_{ideal}} = \frac{\sum_1^{31} T_{pi}}{NME \cdot TT}$$

Operando se llega a una eficiencia ideal de aproximadamente el 98.3 %, sin embargo la eficiencia real se debe calcular con el número real de estaciones, como muestra la siguiente expresión:

$$E_R = \frac{\sum_1^{31} T_{pi}}{T_{real}} = \frac{\sum_1^{31} T_{pi}}{NRE \cdot TT} = \frac{14161}{12 \cdot 1440} \cdot 100 = 82 \%$$

Para finalizar el estudio del equilibrado de la línea se muestra en el siguiente gráfico el tiempo de trabajo de cada estación frente al Takt Time.

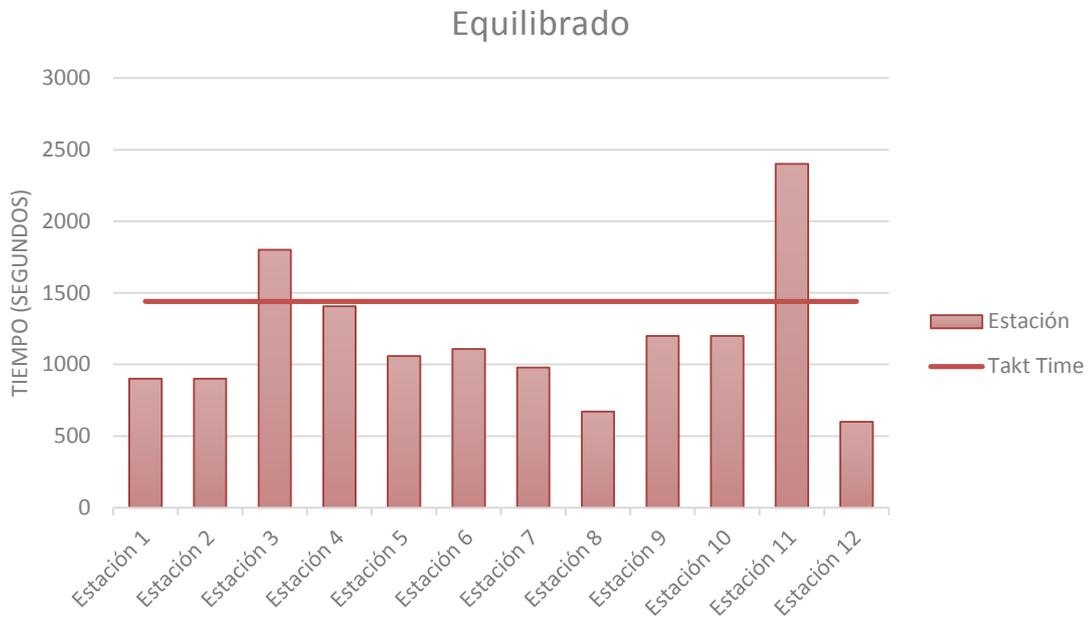


Figura B.4. Solución del equilibrado de la producción de la célula en la situación final. Fuente: Elaboración Propia.

Glosario

AGV: Automatic Guided Vehicle
ALBP: Assembly Line Balancing Problem
ALC: Average Linkage Clustering
AMFEC: Análisis Modal de Fallos, Efectos y Criticidad
BEA: Bond Energy Algorithm
CAD: Computer Assisted Design
CAE: Computer Assisted Engineering
CAM: Computer Assisted Manufacturing
CIA: Cluster Identification Algorithm
CIM: Computer Integrated Manufacturing
CLC: Complete Linkage Clustering
CN: Control Numérico
CNC: Control Numérico Computerizado
DCA: Direct Clustering Algorithm
DNC: Distributed Numerical Control
EPI: Equipo de Protección Individual
FMC: Flexible Manufacturing Cell
FMS: Flexible Manufacturing System
IPR: Índice de Prioridad de Riesgo
ISO: International Organization for Standardization
JIT: Just In Time
KPI: Key Performance Indicator
LCC: Linear Cell Clustering
MCU: Machine Control Unit
OEE: Overall Equipment Efficiency
OPF: One Piece Flow
PFA: Production Flow Analysis
ROC: Rank Order Clustering
SLC: Simple Linkage Clustering
SMED: Single Minute Exchange of Die
TG: Tecnología de Grupos

TPM: Total Productive Maintenance

TPS: Toyota Production System

VSM: Value Stream Mapping

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pedro L. González Rodríguez, Marcos Calle Suárez, «Tipos de Sistemas Productivos y Distribución en Planta», *Tema 1 de la asignatura Instalaciones de Fabricación y Sistemas de Producción*, Universidad de Sevilla, 2013.
- [2] Mikell P. Groover, «Fundamentos de Manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas», 2007.
- [3] Nanua Singh, Divakar Rajamani, «Cellular Manufacturing Systems: Design, planning and Control», 1996.
- [4] Mikell P. Groover, «Automation, Production System and Computer-Integrated Manufacturing», 2ª edición, 2002.
- [5] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, «Manufactura, Ingeniería y Tecnología», 2008.
- [6] Inyong Ham, Katsundo Hitomi, Teruhiko Yoshida, «Group Technology: Application to Production Management», 1985.
- [7] Nallan C. Suresh, John M. Kay, «Group Technology and cellular manufacturing: State of the Art of Research and Practice», 1998
- [8] Nagendra Parashar, «Cellular Manufacturing System: An Integrated Approach», 2009.
- [9] Nanua Singh, Divakar Rajamani, «Cellular Manufacturing System: Design, planning and control», 1996.
- [10] Equipo de desarrollo de Productivity, «Fabricación Celular. Desarrollo de células de fabricación», 2003.
- [11] José J. Escobar Gamero, Miguel Escobar Diosdado, «Curso Lean en la fabricación aeronáutica», 2014.
- [12] Esteban Fernández Sánchez, «Dirección de la producción. Volumen I: Fundamentos estratégicos», 1993.
- [13] Esteban Fernández Sánchez, Camilo J. Vázquez Ordás, «Dirección de la producción. Volumen II: Métodos operativos», 1994.
- [14] Grupo ATISAE, «Máster en Ingeniería del Mantenimiento. Módulo IX: TPM», XI promoción, 2010.
- [15] Lluís Cuatrecasas Arbós, «Organización de la producción y dirección de operaciones. Sistemas actuales de gestión eficiente y competitiva», 2000.
- [16] Lluís Cuatrecasas Arbós, «Diseño avanzado de procesos y plantas de producción flexible: técnicas de diseño y herramientas gráficas con soporte informático», 2009.
- [17] Jose Agustín Cruelles Ruíz, «Mejora de métodos y tiempos de fabricación», 2012.
- [18] Juan Carlos Hernández Matías, Antonio Vizán Idoipe «Lean Manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación», Escuela de Organización industrial, UPM, 2013.
- [19] Mauricio León Lefcovich, «Seis Sigma, hacia un nuevo paradigma de gestión», 2009.
- [20] Manuel Rajadell Carreras, «Lean Manufacturing, la evidencia de una necesidad», 2010.
- [21] <http://www.leanroots.com>
- [22] <http://www.pdcahome.com>
- [23] <http://www.manufacturainteligente.co>