

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Estudio sobre la mejora de eficiencia en una empresa aeronáutica utilizando tecnología de grupos.

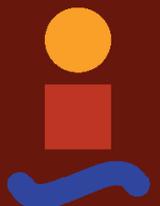
Autor: Marina Isabel Aguilera Olmo

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

**Dpto. de Organización Industrial y Gestión de
Empresas I**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Estudio sobre la mejora de eficiencia en una
empresa aeronáutica utilizando tecnología de
grupos.**

Autora:

Marina Isabel Aguilera Olmo

Tutor:

Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Estudio sobre la mejora de eficiencia en una empresa aeronáutica utilizando tecnología de grupos.

Autora: Marina Isabel Aguilera Olmo

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia, amigos y todas las personas que me han apoyado, animado e insistido para perseguir mis metas.

Marina Isabel Aguilera Olmo

Sevilla, 2019

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado aborda un estudio sobre una posible mejora de la distribución en planta en una empresa del sector aeronáutico. Para ello se ha empleado la tecnología de grupos (en concreto la rama de la fabricación celular) para estudiar un posible cambio de layout a células de fabricación, que mejore la eficiencia de los procesos con respecto a la distribución actual de máquinas en taller tipo “job shop”.

Mediante diferentes heurísticas y métodos que proporciona la teoría de fabricación celular, se ha obtenido una primera solución para la agrupación de máquinas formando diferentes células usando el histórico de pedidos. Esta aplicación de los métodos da como resultado una relación de asociación directa de células de trabajo (compuestas por diferentes máquinas) con familias de artículos (piezas que tienen características en común, en este caso la ruta de procesado).

Posteriormente, con los datos de la cantidad de rutas que se realizan en un periodo de tiempo determinado y las distancias que deben recorrer las piezas, se ha buscado minimizar, mediante un modelo de optimización, los transportes en planta. El modelo se ha resuelto con la herramienta Lingo, relacionando las posiciones disponibles en la planta de trabajo para ubicar las máquinas con las células correspondientes, obteniendo así el layout final propuesto por el estudio.

Por último, se ha utilizado la herramienta de simulación Arena para hacer un estudio más exhaustivo del caso, comprobando así el comportamiento del modelo, como la carga de máquinas o las colas y esperas medias. En este sentido se comparará la distribución actual, con la distribución propuesta, observando la variación de tiempos y comportamiento de las máquinas, recursos y artículos.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	8
Índice	9
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	13
1 Introducción	15
1.1 <i>Introducción.</i>	15
1.2 <i>Objetivos.</i>	15
1.3 <i>Estructura del trabajo.</i>	16
2 La tecnología de grupos	18
2.1 <i>Evolución histórica.</i>	18
2.2 <i>Conceptos necesarios.</i>	19
2.3 <i>¿Qué es la tecnología de grupos y para qué sirve?</i>	20
2.3.1 <i>Enfoque tradicional</i>	20
2.3.2 <i>Nuevas perspectivas</i>	21
3 La fabricación celular	24
3.1 <i>Tipos de sistemas productivos.</i>	24
3.1.1 <i>Sistemas intermitentes</i>	24
3.1.2 <i>Sistemas continuos</i>	24
3.1.3 <i>Sistemas repetitivos</i>	24
3.2 <i>Ventajas e inconvenientes de la fabricación celular</i>	25
3.2.1 <i>Ventajas</i>	25
3.2.2 <i>Inconvenientes</i>	26
3.3 <i>Métodos para la identificación de las familias.</i>	26
3.3.1 <i>Sistema de clasificación y codificación</i>	26
3.3.2 <i>Métodos basados en modelos matemáticos de optimización.</i>	30
3.3.3 <i>Aproximaciones basadas en planes de procesos.</i>	31
3.3.4 <i>Aproximaciones intuitivas y visuales</i>	31
4 Empresa, producto y proceso	33
4.1 <i>La empresa y su estructura.</i>	33
4.2 <i>Departamentos y responsabilidades.</i>	33
4.3 <i>Proceso.</i>	34
4.3.1 <i>Concepto</i>	35
4.3.2 <i>¿Qué es el shootpeening?</i>	35
4.3.3 <i>Control del proceso.</i>	36
4.3.4 <i>Tipos de bola utilizados en la planta a estudiar.</i>	36
4.3.5 <i>Intensidades más utilizadas.</i>	37
4.3.6 <i>Máquinas utilizadas en la planta a estudiar.</i>	37
4.4 <i>Recogida de datos</i>	38
4.5 <i>Layout de la planta.</i>	39
4.5.1 <i>Zona de administración de despachos.</i>	39
4.5.2 <i>Zona de procesado</i>	40
4.5.3 <i>Tratamiento químico en E.L.A. y almacén.</i>	41
5 Agrupación en células: caso práctico	43
5.1.1 <i>Métodos basados en la reordenación de la mariz de incidencia</i>	43

5.1.2	Métodos de agrupamiento jerárquico basados en coeficientes de similitud	45
5.1.3	Métodos basados en modelos matemáticos de optimización.	48
5.1.4	Toma decisión células a formar.	55
6	Asignación de máquinas a localizaciones	57
6.1	<i>Datos</i>	57
6.1.1	Layout de la planta y localizaciones disponibles	57
6.1.2	Distancia entre localizaciones.	58
6.1.3	Ponderación de rutas	58
6.2	<i>Modelo</i>	59
6.3	<i>Resultados</i>	61
7	Simulación discreta	63
7.1	<i>Casos de aplicación de la simulación.</i>	63
7.1.1	Primer caso: 1 célula	63
7.1.2	Segundo caso: 6 células	63
7.1.3	Tercer caso: 5 células	64
7.2	<i>Llegada de piezas.</i>	65
7.3	<i>Recogida de datos de matriz Excel.</i>	66
7.3.1	Atributos de la matriz Excel	66
7.3.2	Módulos para leer Excel	67
7.4	<i>Células.</i>	69
7.4.1	Módulo station	70
7.4.2	Módulo decide	70
7.4.3	Assing antes y después de procesado	70
7.4.4	Procesado	71
7.5	<i>Salida de las piezas.</i>	72
8	Resultados simulación	73
8.1	<i>Resultados célula única.</i>	73
8.1.1	Utilización de recursos	73
8.1.2	Tiempo de procesado	74
8.1.3	Número de transportes inter e intra celulares	74
8.2	<i>Resultados células independientes.</i>	74
8.2.1	Utilización de recursos	74
8.2.2	Tiempo de procesado	74
8.2.3	Número de transportes inter e intra celulares	75
8.3	<i>Resultados 5 células.</i>	75
8.3.1	Utilización de recursos	75
8.3.2	Tiempo de procesado	75
8.3.3	Número de transportes inter e intra celulares	76
9	Conclusiones	77
9.1	<i>Posibles cambios en el modelo</i>	77
9.2	<i>Futuras líneas de trabajo.</i>	77
10	Bibliografía	79
11	Anexos	80
11.1	<i>Lingo. (Lineal Interactive and General Optimizer).</i>	80
11.1.1	Apartado SETS y DATA	80
11.1.2	Desarrollo del modelo	80
11.2	<i>Arena Simulation</i>	81
11.2.1	¿Qué es?	81
11.2.2	Módulos	81

<i>11.3</i>	<i>Métodos de formación de células</i>	88
11.3.1	Matriz de incidencia	88
11.3.2	Resultado método ROC	91
11.3.3	Resultado método DCA	94
11.3.4	Matriz inicial coeficientes de similitud	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Coeficientes de similitud para la formación de células	45
Tabla 2.- Solución de formación de células según el método p-mediana	49
Tabla 3.- Solución de formación de células según el método de asignación	53
Tabla 4.- Distancia entre células	58
Tabla 5.- Cálculo de distancia total de traslados entre células	58
Tabla 6.- Resumen piezas que recorren cada máquina según secuencia	59
Tabla 7.- Cálculo de transportes por combinación de células	59
Tabla 8.- Capacidad de piezas por máquina	71
Tabla 9.- Cargas de trabajo por máquina	73
Tabla 10.- Utilización de recursos en escenario de célula única	73
Tabla 11.- Utilización de recursos en escenario de células independientes	74
Tabla 12.- Utilización de recursos en escenario de 5 células	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1.- Línea temporal principales estudios sobre Group Technology [2]	19
Ilustración 2.- Fases del proceso de tecnología de grupos [2]	20
Ilustración 3.- Tipos de distribución en planta [3]	25
Ilustración 4.-Estructura jerárquica personal	33
Ilustración 5.- Curva de tensión típica	35
Ilustración 6.- Control del proceso	36
Ilustración 7.- Diagrama documentación	38
Ilustración 8.- Recogida de datos de sistema de gestión	39
Ilustración 9.- Layout zona despachos	40
Ilustración 10.- Layout zona de procesado	41
Ilustración 11.- Layout E.L.A. y almacén	42
Ilustración 12.- Muestra matriz de incidencia	43
Ilustración 13.- Muestra matriz solución método ROC	44
Ilustración 14.- Muestra matriz solución método DCA	44
Ilustración 15.- Solución SLCA	46
Ilustración 16.- Solución CLCA	47
Ilustración 17.- Solución ALCA	47
Ilustración 18.- Formación de células según método p-mediana	49
Ilustración 19.- Solución formación de células según método asignación	53
Ilustración 20.- Decisión final de formación de células	56
Ilustración 21.-Familias y asociación a células	56
Ilustración 22.- Posibles localizaciones layout	57
Ilustración 23.-Modelado para la localización de células	61
Ilustración 24.- Solución de modelado para la localización de células	61
Ilustración 25.- Localización final de células	62
Ilustración 26.- Modelado de escenario célula única	63
Ilustración 27.- Modelado de escenario células independientes	64
Ilustración 28.-Modelado de escenario 5 células	65
Ilustración 29.- Estructura llegada de piezas	65
Ilustración 30.- Secuenciación de lectura de datos	66
Ilustración 31.- Formato Excel lectura de datos	67
Ilustración 32.- Estructura lectura de Excel	67
Ilustración 33.- Campos módulo ReadWrite	68
Ilustración 34.-Campos módulo File	68
Ilustración 35.- Campos módulo separate	68
Ilustración 36.- Estructura general modelo	69

Ilustración 37.- Estructura células de trabajo	69
Ilustración 38.- Parámetros Assign	70
Ilustración 39.- Parámetros proceso	72
Ilustración 40.- Estructura salida de piezas	72
Ilustración 41.- Pantalla inicial Arena Simulation	81
Ilustración 42.- Módulo create	82
Ilustración 43.- Módulo process	82
Ilustración 44.- Módulo decide	83
Ilustración 45.- Módulo dispose	83
Ilustración 46.- Módulo Batch	83
Ilustración 47.- Módulo separate	84
Ilustración 48.- Módulo assign	84
Ilustración 49.- Módulo record	84
Ilustración 50.- Módulo resource	85
Ilustración 51.- Módulo queue	85
Ilustración 52.- Módulo variable	86
Ilustración 53.- Módulo schedule	87
Ilustración 54.- Módulo sets	87

1 INTRODUCCIÓN

En esta introducción al trabajo fin de grado se dará una breve visión general de lo que será la presente memoria del trabajo, comentando su estructura y puntos clave. Se hablará de los principales objetivos del estudio, las herramientas y teorías en las que se sustenta y el objetivo final del trabajo.

1.1 Introducción.

La globalización de la oferta por parte de las empresas y la facilidad actual de relación comercial entre empresarios y clientes que se encuentran físicamente alejados ha hecho que la competencia, en cuanto a costes de producción, sea mucho más agresiva. Esto implica que todas las compañías tienen que esforzarse al máximo en reducir el coste sin bajar la calidad del producto o servicio, para tener un margen de beneficio más amplio y seguir manteniendo un modelo de negocio solvente. [1]

A las empresas se les exige:

- Mayor respuesta, con un lead-time menor.
- Mayor variedad de productos.
- Mejor calidad en la producción.
- Menor precio.

Todas estas exigencias, entran en aparente conflicto, por lo que es importante destinar esfuerzos a mejorar continuamente el sistema productivo y acercarse lo máximo posible a las expectativas del cliente. Por este motivo en las últimas décadas la importancia de los sistemas de gestión y control de la producción se han hecho tan necesarios, poniendo en valor su papel y destinando gran cantidad de recursos a mejorarlos.

La importancia de estos sistemas de gestión ha desembocado en un amplio estudio de la producción, hasta llegar a un punto en el que algunas empresas se encuentran muy automatizadas, en las que cada uno de los tiempos y de los movimientos que suceden durante la producción está calculado y matemáticamente optimizado. Este movimiento, denominado Industria 4.0 es al que aspiran la mayoría de las grandes empresas actualmente. Esta metodología se basa en la mejora continua, siendo el nivel de precisión y control muy exhaustivo. Para ello se precisa de una exigencia máxima a todos los niveles y el uso de herramientas potentes capaces de gestionar un nivel muy elevado de datos para tomar decisiones rápidas y eficaces.

Uno de los métodos para mejorar la eficiencia de una planta de trabajo consiste en la aplicación de la tecnología de grupos. Consiste en concentrarse en la reducción de los transportes entre células, disminuyendo así significativamente el coste de transporte, modificando el layout de la planta mediante la creación de células de trabajo, que se componen de una serie de máquinas que comparten una serie de características, parámetros o funciones. Este método es el que se empleará en el estudio, aplicándolo a un caso real de una empresa del sector aeronáutico.

1.2 Objetivos.

El objetivo principal de este proyecto es encontrar una solución que mejore la eficiencia de procesos en una empresa de tratado superficial de piezas del sector aeronáutico y de automoción. Para ello se utilizarán diferentes metodologías, principalmente la fabricación celular de la tecnología de grupos y la simulación discreta.

La consecuencia directa de la mejora de eficiencia se verá reflejada en el tiempo total de procesado. Con los datos reales de 1 año de procesado y la realización de simulaciones discretas con el programa Arena Simulator, se podrán comparar diferentes escenarios propuestos por las diversas herramientas de optimización en fabricación celular.

Este objetivo principal se alcanza a través de los siguientes objetivos parciales del trabajo:

- **Objetivo parcial 1:** Elaborar un marco teórico en el que se investiga sobre el nacimiento de la

tecnología de grupos, las posibles aplicaciones y las ventajas e inconvenientes de ésta.

- **Objetivo parcial 2:** Estudio de algunas de las técnicas que propone la fabricación celular dentro de la tecnología de grupos.
- **Objetivo parcial 3:** Aplicación de las técnicas para la identificación de células y familias que formarán el modelo propuesto.
- **Objetivo parcial 4:** Diseño de un modelo de optimización para localizar las células previamente definidas en la planta de trabajo.
- **Objetivo parcial 5:** Comparar, mediante la simulación discreta las variaciones en los resultados de los escenarios actual y el propuesto por las técnicas utilizadas.

1.3 Estructura del trabajo.

- **Base teórica (capítulos 2 y 3)**

En estos apartados se recogen los diferentes estudios y herramientas que existen en torno a la tecnología de grupos y la fabricación celular, comenzando con un breve marco teórico, en el que se contextualizan los diferentes estudios y aplicaciones de la tecnología de grupos.

También se comentan las ventajas e inconvenientes del sistema, así como algunos ejemplos en los que puede resultar muy útil esta metodología. Se explica también la evolución de la técnica, comentando los diferentes enfoques y las ventajas de los nuevos enfoques respecto a los antiguos. En la mayoría de los casos, estos nuevos enfoques están sustentados por avances tecnológicos, o programas que se han creado para permitir una mejor gestión y control de los procesos.

- **Estudio de la empresa y el caso a estudiar (capítulo 4)**

En esta parte del estudio se comentan las principales características de la empresa, así como los datos que se emplean en el caso y cómo se recogen. También se habla del funcionamiento y características de la empresa, ya que tiene un funcionamiento particular debido al tipo de demanda que gestiona. Al ser una empresa de tratamiento de las piezas, éstas deben estar físicamente en la planta para su procesado, además de tener un abanico de diferentes piezas muy amplio. Esto hará que la planificación de la producción sea muy compleja, también que se requiera una gran flexibilidad y adaptación a los cambios, así como retrasos en la entrega de piezas o posibles no conformidades.

- **Formación de células (capítulo 5)**

El primer paso para realizar este estudio consiste en identificar las células en las que se van a agrupar las máquinas de la planta. Para ello, se han utilizado diferentes herramientas de la fabricación celular, agrupando las herramientas en tres enfoques, cada uno, progresivamente más complejo a la par que preciso. Primero encontramos los métodos que, con diferentes premisas reordenan la matriz inicial para formar las células asociadas a familias de artículos. Por otro lado, los métodos que se basan en coeficientes de similitud, que, con la matriz de incidencia, calcula coeficientes de similitud que, con diferentes tomas de decisiones crearán las células correspondientes. Por último, los métodos más complejos, serían los que utilizan un modelo matemático de optimización para crear las células de trabajo maximizando las similitudes y minimizando las diferencias, posteriormente se empleará otro modelo para asignar las familias de piezas a la célula que corresponda.

- **Estudio de Layout (capítulo 6)**

Una vez tomada la decisión de las células a formar, es importante realizar un estudio de layout para ver en qué posición física de la planta se colocarán estas células. Para ello se ha utilizado un modelo de optimización en el que se busca minimizar la distancia total recorrida por las piezas.

Es importante hacer un estudio inicial de la planta en la que se va a trabajar y considerar todas las opciones de ubicación posible. Una vez realizado este estudio y con los datos de las rutas que siguen las piezas, los datos de la cantidad de piezas que se procesan en un intervalo de tiempo determinado y las distancias entre las posibles localizaciones, el modelo de optimización anteriormente comentado, asociará las 5 ubicaciones propuestas, a las

5 células de trabajo dadas por las técnicas de formación de células.

- **Simulación discreta en Arena (capítulo 7)**

Para un mejor estudio de los datos se ha decidido simular el proceso mediante la herramienta Arena. Esta parte del estudio queda fuera del método de tecnología de grupos, aunque sirve para comprobar que los cambios que se proponen realizar en la planta realmente mejoran los tiempos de producción y por lo tanto los costes de procesado.

También ayuda a observar el comportamiento del modelo, así como las cargas de trabajo en las diferentes células y los tiempos de finalización de éstas. Para esta simulación, se han utilizado los datos reales de tiempo de procesado de 1 año en la empresa, suponiendo este intervalo de tiempo como una muestra suficiente para el estudio del proceso.

- **Resultados y conclusiones (capítulos 8 y 9)**

En esta última parte del trabajo, se plantean diferentes soluciones basadas en el estudio. Se explica el comportamiento del modelo y se desglosan diferentes aspectos del proceso. También se ofrecen otras vías de mejora que se puedan adaptar mejor al comportamiento de los datos y algún ejemplo de aplicación de estas.

2 LA TECNOLOGÍA DE GRUPOS

En este apartado se va a introducir la principal herramienta utilizada en el estudio; la tecnología de grupos. Se explica su evolución, las diferentes fases a las que se ha visto sometida y los diferentes enfoques que se le han dado a esta herramienta. Esta información va a ser necesaria para comprender la utilidad y contexto de la fabricación celular, una de las ramas de la tecnología de grupos, en la que se basa este proyecto.

2.1 Evolución histórica.

Con el tiempo y la experiencia, el ser humano ha sido capaz de ir perfeccionando la forma de construir objetos y herramientas que les han sido útiles. La forma más antigua de gestionar el trabajo a la hora de crear estos objetos ha sido la **job production** [2]. En este sistema de trabajo las tareas a realizar sobre la pieza se hacen una a una; es un tipo de trabajo que se sigue utilizando para tareas en las que los procesos tienen poco en común entre ellos, como trabajos artesanales con alto contenido creativo, en los que cada pieza que se crea es única. También ocurre actualmente con trabajos en los que la pieza que se crea es muy diferente a otra tanto por sus características, como por los procesos que se emplean para crearla, por lo que se empieza a trabajar individualmente con cada objeto.

Esto ha ocurrido así durante muchos siglos, hasta que, el concepto de producción en masa (**mass production**) atribuido a la empresa de Henry Ford da un vuelco a la forma de entender la producción, comenzando así la segunda revolución industrial. En 1901, la compañía Ford apuesta por una forma de producción en la que se divide el trabajo por operaciones, en vez de por piezas, completando cada uno de los operarios un conjunto de tareas necesarias para montar un coche y especializándose mucho en las mismas. Esto dio lugar a una alta especialización de los operarios y a una reducción del tiempo de proceso total para cada coche.

La reducción de tiempo de procesos conlleva a una reducción del coste de producción y por lo tanto ofrece a la empresa la posibilidad de reducir el coste de venta, creando una competencia feroz para todas las demás empresas automovilísticas y posicionándose así estratégicamente en el mercado.

Esta forma de producción es muy útil para empresas que trabajan con una producción muy alta (mucha cantidad de producto) pero muy plana (poca variedad) ya que es muy eficiente, pero complicado a la hora de cambiar de producto que se fabrica. Otro de los problemas es que la inversión inicial en una empresa de estas características suele ser muy alta, por lo que un cambio en el modelo de producción implica un coste elevado. Por este motivo es un buen sistema para empresas que son sostenidas por una demanda muy estable, segura, elevada y fácilmente previsible.

La vuelta de tuerca que se le dio a la forma de producir, la alta exigencia de los clientes y la dificultad añadida de la necesidad de resaltar frente a la competencia hace que a partir de esta primera ola aparezcan muchas nuevas técnicas y se le da una gran importancia a los tiempos y a la forma en la que se produce, buscando siempre formas originales y solventes de reducir costes sin bajar la calidad del producto.

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente es un sistema muy eficiente para una casuística muy concreta que no siempre se da, por lo que surgió un tercer sistema de producción que reúne la eficiencia de la producción en cadena y la flexibilidad (permite fabricar objetos o piezas diferentes con un mismo sistema). A este sistema se le da el nombre de producción por lote (**batch production**).

Este sistema consiste en agrupar una cantidad de piezas, crear un lote y trabajar con él, esto hace que se apliquen muchas de las ventajas de la fabricación en masa, ya que se sigue mejorando la velocidad de trabajo y la eficiencia de las tareas, sin renunciar completamente a una producción más flexible, en la que la cantidad de producción es más controlada.

Otra de las ventajas de este tipo de producción es que un defecto en el producto es más fácilmente rastreable y no habría que parar y retirar toda la producción, solamente habría que solventar los problemas con ese lote en concreto.

Posteriormente a estos tres cambios de panorama en cuanto a la forma de fabricar, ha habido muchos

investigadores que han trabajado por mejorar la eficiencia de las empresas, entre ellos, al que se puede considerar uno de los primeros pioneros de la tecnología de grupos, Flanders, quien en 1924 dedicó gran parte de su carrera a buscar soluciones para los problemas que planteaba la producción por lotes (un primer estudio de lo que ahora conocemos como fabricación celular, desarrollada por Nimmons 42 años más tarde). No es hasta 1966 que se empieza a dar importancia, tanto mediante su aplicación en diferentes empresas, como mediante publicaciones en diferentes revistas científicas a el concepto de **Group Technology**.

En el siguiente esquema se pueden ver claramente que hay, en un intervalo de unos 20 años, 8 personas que dedicaron sus estudios a mejorar los procesos de producción, mediante diferentes técnicas de optimización, todas relacionadas con la tecnología de grupos. Esto es un elevado número de visiones diferentes que se aportaron a esta corriente y un gran avance en cuanto a la cantidad de información e investigación relacionada con este tema, aportando cada uno una significativa mejora y perfeccionando o completando la técnica en cualquiera de sus áreas.

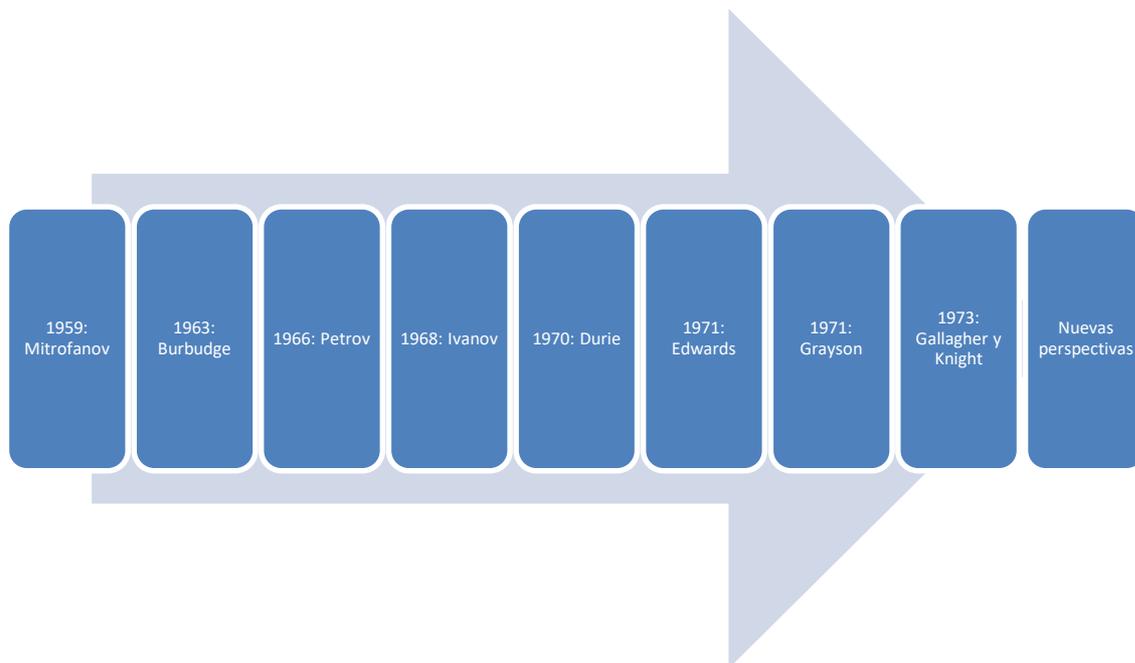


Ilustración 1.- Línea temporal principales estudios sobre Group Technology [2]

A partir de los años 70 la filosofía japonesa **Lean Manufacturing** se alineó bastante con este tipo de producción, dedicando esfuerzo a no solo hacer un proceso amplio y sin fallos, teniendo muy en cuenta la eficiencia y la precisión de los procesos. En este sentido se desarrollan técnicas que van a tener mucho que ver con esta filosofía, y que en muchos casos serán compatibles, e incluso complementarias. Algunos ejemplos de estas son las tecnologías de manufactura flexible, o la (CIM) computer integrated manufacturing (herramienta que facilita mucho el control y planificación de la producción). También la fabricación celular (uno de los aspectos más importantes de la group technology) es una de las bases en las que se sustenta el sistema de producción just-in-time, en la que muchas empresas están trabajando para minimizar el stock y los tiempos de espera.

2.2 Conceptos necesarios.

Lead time: Consiste en el tiempo que transcurre desde que se crea la orden de trabajo, hasta que la pieza esta lista para ser entregada, esto incluye:

- Tiempo en cola: Tiempo que pasa la pieza esperando a que otro proceso finalice o que el operario esté disponible para trabajar con ella. Una forma de reducir este tiempo sería con un buen balanceado de máquinas, intentando que la carga de trabajo en todas sea parecida se conseguirá que el tiempo de cola disminuya, reduciendo así el Lead Time y reduciendo de esta forma los costes de producción.
- Tiempo de setup: Tiempo de preparación, cambio de útiles u otros cambios necesarios para realizar el proceso que le corresponde a la pieza. Hay algunas técnicas que se centran en reducir este tiempo, como

el SMED (herramienta del Lean Manufacturing) que intenta encontrar el equilibrio entre que una máquina tenga flexibilidad a la hora de trabajar con diferentes productos y/o procesos y por otra parte que el tiempo de setup sea el mínimo posible. Esto se traducirá en una producción eficiente, pero flexible en cuanto a la amplia gama de productos ofertados. Como se comentaba anteriormente esta casuística es una de las imposiciones del mercado más difíciles de satisfacer.

- **Tiempo de proceso:** Tiempo propio que la máquina u operario está trabajando con la pieza. Este tiempo es más complicado de disminuir que los dos anteriores, aunque también es posible hacerlo optimizando los movimientos o con una maquinaria más eficiente.

Lean Manufacturing: es un conjunto de herramientas creado por la empresa japonesa Toyota, que da una respuesta práctica a problemas que pueden tener los sistemas, dando mucha importancia a la eficiencia de todos y cada uno de los procesos que componen el sistema productivo. Es un concepto que bebe de muchísimas otras herramientas y es compatible con otras técnicas y mejoras.

Work in progress: Son los artículos que se encuentran en un estado intermedio de su producción, por ejemplo, si una pieza final es el resultado de ensamblar 3 componentes diferentes, entonces cada uno de esos componentes será work in progress. Es interesante este concepto, ya que cuando se producen colas o esperas, estos materiales se deben almacenar durante la producción, creando, sin una buena gestión, algunos problemas logísticos.

2.3 ¿Qué es la tecnología de grupos y para qué sirve?

La Tecnología de grupos (*Group technology* en inglés) es un sistema de organización de la producción que permite a las empresas minimizar el work in progress y los costes, sin renunciar a producir una amplia gama de productos.

Esto se consigue agrupando diferentes recursos (máquinas, herramientas y personal) en células (diferentes grupos), encargándose cada una de una familia de productos.

2.3.1 Enfoque tradicional

En 1985 Suresh y Meredith agruparon los usos y enfoques de esta tecnología en 5 áreas diferentes, facilitando así la forma de resolver el problema. Esto fue muy útil, aunque posteriormente y gracias a las nuevas herramientas y enfoques se puede aplicar la metodología de una forma más integrada.



Ilustración 2.- Fases del proceso de tecnología de grupos [2]

1. **Ingeniería de diseño:** La creación de una base de datos resulta muy útil para reducir esfuerzos en el proceso de diseño. En muchas ocasiones uno de los diseños anteriores puede facilitar mucho el trabajo de los nuevos diseños y ahorrar muchas horas y por lo tanto coste. Para que esto sea una realidad es necesaria una muy buena gestión de la información y un fácil acceso a ella.
2. **Planificación del proceso:** De la misma forma que con la ingeniería de diseño, para la planificación del proceso productivo resultará muy útil la información histórica de otras planificaciones ya realizadas.

Esto permitirá a los responsables de creación del proceso aprender de los errores ya cometidos y basarse en los aciertos. Como un paso más, se plantea crear una base de datos que incluya ambas informaciones, haciendo que se complementen los procesos. Esto resulta en que, desde el proceso de diseño, al tener más información le resulta viable facilitar la planificación de producción.

3. **Fabricación celular:** Es una forma de entender la producción, aunque se muestra como un cambio de layout en la planta. Este concepto de layout considera diferentes células de trabajo, agrupadas por diferentes motivos, como pueden ser: características de las piezas que tratan, parámetros comunes o procesos similares. Esta forma de trabajar toma ideas de la fabricación tipo taller, en la que el concepto es parecido (células de trabajo claramente separadas) con la diferencia de que los criterios para crear estas células son diferentes.

Para crear las células de trabajo tipo taller el criterio principal es el tipo de proceso que se realiza en cada módulo, por ejemplo, se deja en un lado de la planta de trabajo la zona de fresado, en otra la de ensamblaje y en otra las máquinas de corte. Sin embargo, la fabricación celular los criterios de formación de células son las familias, una familia se forma cuando las piezas que van a recorrer esa célula comparten una serie de características.

Los procesos de formación de células son complejos, ya que buscan encontrar la asociación de máquinas necesaria para que cada pieza que pase por la célula de trabajo realice el máximo número de operaciones en ella (esto hará que no sea necesario desplazarse a otra célula de trabajo, reduciendo así los transportes y, por lo tanto, los costes) sin caer en células de trabajo demasiado grandes, ya que se caería en un modelo de trabajo en cadena y hace que las colas y tiempos de espera dentro de la célula aumenten considerablemente.

Los beneficios de la fabricación celular son:

- Reducción del Lead Time y del almacenaje del Work in Progress (WIP). También ayuda a que el Lead Time sea más estable y controlado, facilitando así la gestión de los tiempos de proceso y haciendo más fácil el balance de la carga de trabajo entre máquinas.
 - Reducción del tiempo de Setup gracias a las características comunes de las piezas que componen una familia (asociada a una o más células). Esto, como consecuencia reducirá el Lead Time.
 - Facilita el flujo de trabajo y el movimiento de piezas y materiales en planta, ya que todas las operaciones que se le realizan a una pieza se concentran en un espacio designado a ello.
 - Mejor control de las operaciones.
 - Posibilidad de realizar varias operaciones al mismo tiempo, ya que todos los materiales o maquinaria necesaria se reúnen en el mismo espacio. Esto se traduce en una reducción del Lead Time y en una detección de fallos más temprana.
4. **Planificación y control de la producción:** Uno de los mayores problemas en este ámbito es el control del material y el stock, se ha observado que los métodos tradicionales no son eficaces, por lo que se ha apostado por aplicar métodos como el MRP (material requirement planning), combinados con la filosofía JIT (just in time).
 5. **Otras funciones:** Esta forma de trabajar se ha demostrado también que resulta en una mejora de la calidad del producto, debido al control que se le aplica a cada pieza. También supone una logística más eficiente y una más y mejor utilización de los recursos.

2.3.2 Nuevas perspectivas

Algunas de las nuevas ramas que también se pueden considerar parte de la tecnología de grupos, según las corrientes más actuales son:

a) **Business processes:**

La filosofía de reingeniería de procesos recogida por primera vez por Hammer en 1990 es el claro ejemplo de la idea de la importancia que se le da a la gestión administrativa, pudiendo ahorrar también en ésta algunos

costes.

La base de esta visión consiste en replantearse los procesos y las decisiones que se toman en una empresa, tomando cada una de las decisiones amparándose en estudios o cálculos que aseguren que es la más eficiente. El objetivo principal de esta filosofía es mejorar la eficiencia, la eficacia, la productividad y la efectividad del proceso.

Lo más difícil de este tipo de visión es salir de la forma habitual de hacer las cosas y encontrar una solución diferente que pueda ser mejor. Siempre es importante, una vez decidida e implantada comprobar que esta nueva forma de actuar efectivamente da los resultados esperados. Algunas de las técnicas que se utilizan para que se pueda encontrar esta nueva manera, para evaluar el sistema actual, o para controlar las mejoras pueden ser:

- **Brainstorming:** Esta técnica consiste en una sesión de lluvia de ideas, en la que se plantea el problema que se quiere atajar y un elevado número de soluciones, después se vota cuál de estas soluciones se considera mejor. Una de las grandes ventajas de esta técnica es que se toma una muestra representativa de diferentes ámbitos de la empresa, por lo que no es la persona que trabaja en esa área la que propone soluciones. De esta manera se consiguen alternativas muchas veces radicalmente diferentes y muy útiles, que la persona que convive con la casuística muchas veces no ve.
- **Diagrama de afinidades:** Es una forma de relacionar ideas, mediante diferentes criterios. Se hace de una forma muy visual que facilita considerablemente la toma de decisiones, ya que están mucho más claras las alternativas ofrecidas y las diferencias y similitudes entre ellas.
- **Diagrama de interrelaciones:** Se utiliza para comprender un problema complejo. En la mayoría de los casos tanto los problemas como las causas son múltiples y suelen estar interrelacionados. Este diagrama ayuda a que se pueda plantear el problema de una forma más visual. Se compone bloques y flechas, elementos que facilitan la tarea, mientras más flechas salgan de una causa, más elementos dependen de ella y por lo tanto más importante es, por otro lado, mientras más flechas lleguen a un problema, de más factores depende y más difícil será encontrar una solución simple.
- **Diagrama causa-efecto:** Para un mismo problema, busca todas las posibles causas, agrupándolas por diferentes categorías y ramificándose éstas en otras subcausas. Crea una visión general y ordenada de todos los motivos por los que se puede producir el problema que se intenta solucionar. Este método no propone ninguna solución al problema.
- **Gráfico de control:** Mediante diferentes parámetros, se va almacenando la información necesaria que pueda tener un problema.
- **Diagrama de Pareto:** Los recursos de una empresa son limitados, por lo que otra de las decisiones importantes que se toman en una empresa a la hora de hablar de la mejora del proceso es: ¿a cuántas y qué problemáticas se le destinan los recursos? Para tomar esta decisión una de las herramientas más útiles es el diagrama de Pareto, que, mediante diferentes parámetros jerarquiza los problemas.
- **Benchmarking:** Consiste en comparar, normalmente mediante una serie de indicadores, los procesos y actividades que se realizan en la empresa a estudiar, con los de otras empresas, aprendiendo así mutuamente de los errores. También se pueden comparar con procesos similares de la misma empresa, ya que la mayoría de las veces el factor de la competencia hace muy complicado conseguir los kpis de otras empresas de un mismo sector.

Esta forma de entender la empresa es una de las claves de la precisión en cuanto a costes, no es solo importante que el proceso de producción sea lo más eficiente posible, también es muy importante conocer a el cliente al que va destinado el producto y, sobre todo, lo que éste valora. Eliminar atributos que no son útiles para el cliente y añadir otros que sí lo son, puede hacer que la relación costes de producción-precio de venta sea mucho más beneficiosa para la empresa. A esta forma de entender el modelo de negocio, donde el foco está en minimizar todo lo que el cliente no valora a la hora de la compra, como transportes, fallos u otros complementos, se le llama **value-delivering**.

Esto sustituiría al enfoque clásico, en los que se trabaja por diferentes procesos, marcados como áreas independientes que no interaccionan entre sí. Normalmente son, por este orden: diseño, planificación de proceso, desarrollo e innovación, contabilidad y marketing.

b) Mejoras en la ingeniería de diseño:

La forma de diseñar ha cambiado drásticamente desde los años 70. Este cambio se debe en gran medida a las herramientas gráficas que se han desarrollado, facilitando mucho el diseño y el modelado virtual del objeto final que se desea diseñar. Por otro lado, la visión de la empresa como un proceso continuo, es decir, un conjunto en el que todos los procesos están de alguna forma relacionados, ha hecho que desde el proceso de diseño ya se vayan teniendo en cuenta todos los procesos posteriores; la fabricación, el control de calidad o su posterior venta.

En este sentido aparecen diferentes enfoques a la hora de diseñar, por ejemplo; DFMA (Design for Manufacture and Assembly), es una técnica que facilita el ensamblado de las piezas, muchas veces incluso dejándosela al cliente final, concepto que facilita mucho los transportes de las piezas que formarán el artículo final y reduce el espacio de almacenaje.

3 LA FABRICACIÓN CELULAR

La fabricación celular es una de las aplicaciones de la Tecnología de Grupos. Consiste en agrupar los componentes en conjuntos a los que se le denominará “familias”. Cada una de estas familias, llevará asociado un conjunto de máquinas donde son procesadas, a los que se les denominarán “células”. De esta forma se pueden obtener numerosas ventajas, como: disminuir la necesidad de herramientas por puesto de trabajo, reducción de tiempos de setup, reducción de inventarios, mejorar la calidad de los productos, debido al control al que se someten. Como principal inconveniente cabe destacar una mayor inversión inicial, ya que se considera duplicar algunas máquinas y herramientas, con el objetivo de crear una célula de trabajo más funcional.

3.1 Tipos de sistemas productivos.

Para aplicar esta técnica de una manera efectiva, es importante conocer bien los diferentes tipos de Sistemas de producción, ya que en unos casos será beneficioso implantar el método de fabricación celular, mientras que en otros se puede resultar incluso contraproducente. Para ello se consideran 3 tipos de sistemas [3]:

3.1.1 Sistemas intermitentes

En estos casos, la demanda de los productos es intermitente, es decir, los procesos o piezas que se realizan, son muy variados e irregulares. Por lo tanto, crear un proceso único y estable en el tiempo es una tarea muy poco eficaz. El ejemplo más claro para entender este tipo de procesos es un taller mecánico, la demanda es inestable y, además, cada coche que precisa ser reparado presenta un problema diferente y, por lo tanto, una solución (proceso de reparación) diferente.

Para este tipo de sistemas, el modelo en planta más eficiente será la distribución tipo “**job shop**”, en este caso, las máquinas y herramientas se ubicarían en función de proceso que realizan, o la utilidad de ellas, respectivamente. En este tipo de plantas de trabajo, es especialmente necesaria una buena planificación y control de los procesos, por cada taller independiente, esta planificación reducirá el tiempo de esperas, que reducirá la productividad del sistema y aumentará el lead time total.

3.1.2 Sistemas continuos

Este sistema sería el modelo contrario al anteriormente explicado, en este caso se presenta una gran cantidad de producto, pero poca diversidad de artículos y a su vez procesos diferentes. En este tipo de sistemas se implantará la distribución “**flow shop**”, en este caso, las máquinas se sitúan en serie, creando un proceso continuo, compuesto por diferentes fases o procesos.

La principal ventaja de este tipo de sistemas es el coste de producción por artículo, que se reduce de forma significativa, también la sencillez de control de este sistema, con respecto al anterior. Por otro lado, precisa de una elevada inversión inicial, por lo que es importante hacer un buen estudio de rentabilidad. Otro de los grandes inconvenientes es que una parada por anomalías en el proceso, conlleva una parada de toda la producción, al igual que un defecto en el proceso podrá afectar a una gran cantidad de artículos, creando graves problemas de material defectuoso y, con ello, grandes pérdidas.

3.1.3 Sistemas repetitivos

Es un sistema híbrido entre los dos anteriores, se compone de lotes de artículos, cada uno compuesto por diferentes tipos de productos. Para satisfacer las necesidades de este tipo de sistemas hace falta un modelo de trabajo que tenga las ventajas de eficiencia de la distribución flow shop y de flexibilidad de la distribución job shop. En ello se enfocan los estudios de la tecnología de grupos. Dentro de la misma hay diferentes tipos de

enfoque, tecnología de grupos en serie, tecnología de grupos celular (que se corresponde con la fabricación celular, método que se estudia en este trabajo) y la tecnología de grupos por centros. Estas teorías proponen diferentes células de trabajo, en las que cada una funciona como una pequeña línea de producción, aunando así algunas características de ambas distribuciones.

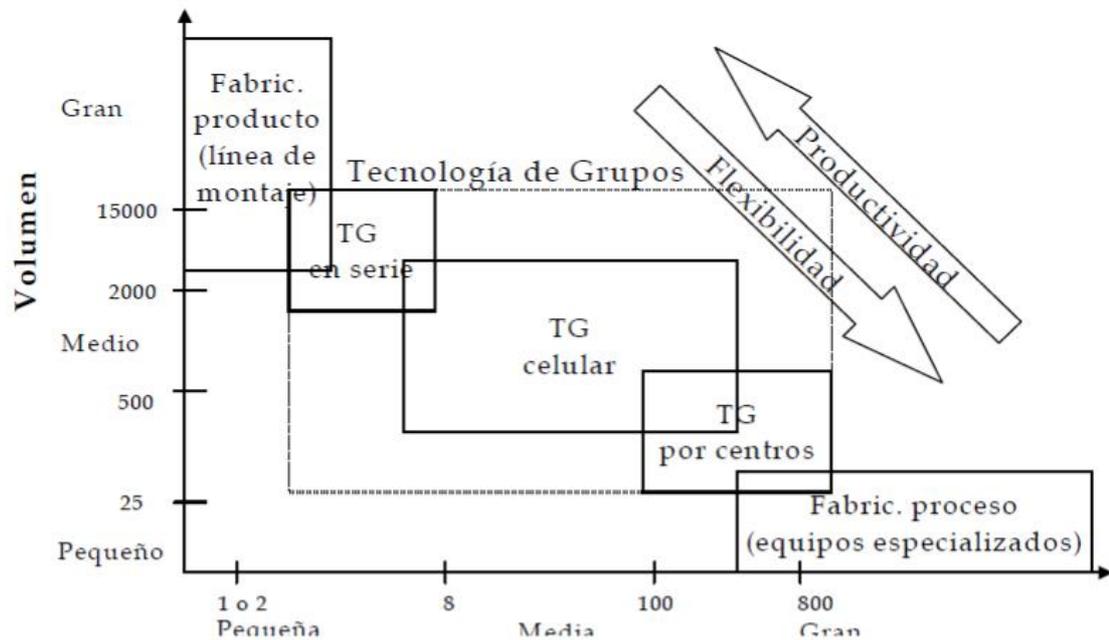


Ilustración 3.- Tipos de distribución en planta [3]

3.2 Ventajas e inconvenientes de la fabricación celular

3.2.1 Ventajas

- **Manejo de materiales:** La manipulación y transporte de los materiales es una de las grandes ventajas de este sistema, al tener todas las herramientas o máquinas necesarias para tratar el lote, en el mismo espacio físico, las distancias que hay que recorrer con los materiales necesarios para el trabajo se reducen significativamente.
- **Uso de herramientas:** Se ubican las herramientas de trabajo en las células donde son necesarias, por lo que no es necesario ir a buscar las herramientas a un panel general, esto implica un mejor control de estas, ya que no se trasladan y reducir los desplazamientos del operario.
- **Tiempo en sistema:** La proximidad de las máquinas dentro de una misma célula implica la reducción de tiempos de transportes y como consecuencia la rección del tiempo en el sistema.
- **Tiempo de preparación:** La especialización de las células hace que el setup entre lotes diferentes se reduzca. Por norma general, cuanto más flexible se necesite que sea la célula (es decir, menos características en común tenga la familia de artículos asociada), más tedioso y lento será el set up que se le realiza a la célula para cambiar de lote.
- **Tamaño de lote:** Cuanto más corto sea el tiempo de preparación, más pequeño será el lote óptimo, ya que es más fácil cambiar de un lote a otro.
- **Trabajos en proceso e inventarios:** Se reduce significativamente la necesidad de almacenamiento intermedio entre procesos, ya que todo el lote de producción queda ubicado en el mismo puesto, haciendo que se almacene en la misma célula hasta su finalización.
- **Especialización de los operarios:** Al realizar repetidamente tareas, si no iguales, muy parecidas, la eficiencia del operario aumenta, reduciendo así los tiempos de procesado.

3.2.2 Inconvenientes

- **Inversión de capital:** El concepto de fabricación celular implica que cada célula debe estar compuesta por todas las máquinas que necesitan las familias de piezas asociadas. Esto supone, en muchos casos la duplicidad de algunas máquinas, lo que implica necesariamente una inversión inicial de capital. En el caso de que esto no sea una solución viable (ya sea porque el elevado coste de la máquina hace muy difícil rentabilizar la inversión, o por otras casuísticas de la empresa, como, por ejemplo, el espacio físico en planta) existe la posibilidad de que haya familias que deban recorrer varias células para finalizar su proceso, para ello se estudia el caso y se intenta localizar las células lo más cerca posible para minimizar los transportes.
- **Utilización de las máquinas:** Al aumentar el número de máquinas sin elevar la demanda, se reduce la utilización de éstas. Esto, además puede provocar un desequilibrio en la carga de las máquinas, estando algunas células infrautilizadas y otras, con una carga de trabajo demasiado elevada.

3.3 Métodos para la identificación de las familias.

En este apartado se verán los diferentes métodos que propone la fabricación celular para la identificación de familias, así como de sus células asociadas. Es una de las fases más complicadas e importantes del proceso, ya que una buena o mala identificación de las familias de productos será decisiva en los resultados finales de eficiencia. Todo el modelo se basará en ello, y en el caso de que se llegue a implementar supone destinar recursos para el cambio, por lo que en principio no es fácil corregir un error o un cambio de visión en este sentido.

Hay tres principales enfoques para este proceso, desde los cuales se desarrollan muchas variaciones y heurísticas en las que basarse, con diferentes herramientas y estudios que las sustentan. Cada enfoque representa diferentes niveles de dificultad y precisión en los resultados. Así como la recogida de datos es más sencilla utilizando el proceso visual e intuitivo, su resultado es subjetivo y depende de la experiencia y el conocimiento de la empresa de la persona que realice el estudio. Por otro lado, las aproximaciones basadas en planes de proceso precisan de un gran conocimiento del proceso completo y los sistemas de clasificación son buenas aproximaciones, aunque precisan una buena recogida de datos inicial para llevarlos a cabo.

A continuación, se explican los 3 enfoques y sus técnicas más conocidas y utilizadas [4].

3.3.1 Sistema de clasificación y codificación

Teniendo en cuenta diferentes parámetros tales como tamaño, procesos, componentes, características del producto u otros muchos, mediante diferentes procedimientos, se puede clasificar los productos en familias, a la que se le adjudican unos recursos (máquinas, personal, material...) con los que trabajará de forma independiente.

Se han desarrollado muchos sistemas de codificación a lo largo de los años en diferentes países, como los métodos Brish, Opitz, MICLASS, o CODE. En este apartado explicaremos los diferentes métodos y posteriormente, en el apartado 5 se resolverán, obteniendo así la formación final de piezas y familias.

En esta agrupación, se ordenan las técnicas de menos a más complejas. Esta complejidad proporcionará también más precisión en el resultado y por lo tanto una solución basada en más información y más cercana a la formación óptima.

3.3.1.1 Métodos basados en la reordenación de la matriz de incidencia

Son técnicas que, mediante diferentes tomas de decisiones modifican la matriz de incidencia, de forma que los 1s en la matriz quedan agrupados, formando así las células. Es un método sencillo y práctico, aunque poco preciso, ya que la formación final de las células se crea de manera visual y depende de la técnica que se utilice favorecerá una parte de la matriz u otra (por ejemplo: con el método SLCA la parte Noroeste de la matriz quedará bien agrupada, mientras que las demás son menos precisas).

En cualquier caso, son buenas técnicas para una primera aproximación al problema, ya que permiten observar los datos y entenderlos de una forma visual, teniendo claro qué máquinas son las más utilizadas y la incidencia

entre estas.

Para este tipo de métodos, se necesitarán como datos iniciales las piezas que se producen en la planta, las máquinas actuales que se utilizan y la relación entre ellos. Esta relación se ejemplifica en una **matriz de incidencia**, compuesta por 1s y 0s, en ella, si en la posición (1,2) se encuentra un 1, significará que la pieza 1 precisa de procesamiento en la máquina 2, por el contrario, si se encuentra un 0, significará que no lo precisa.

Estas técnicas son iterativas, mediante la manipulación de la matriz de incidencia, moviendo sus filas y columnas, se construyen submatrices en las que se agrupan los 1s, estas submatrices se convertirán en las células si se observan las columnas (máquinas) y familias si se observan las filas (artículos).

Son métodos no muy complejos, que suelen dar una solución bastante aproximada.

A continuación se muestran algunos de estos métodos:

a) **ROC (Rank Order Clustering)**

El método consiste en asignar un coeficiente a cada columna, la primera columna tendría el valor 2^0 , el segundo 2^1 , el tercero 2^2 y así sucesivamente. Posteriormente se pasa a contabilizar cada una de las filas, multiplicando los valores binarios 1 por su coeficiente correspondientes. Esto nos dará unos coeficientes asociados a cada fila, según los cuales se reordenará la matriz por orden descendente.

A continuación, se sigue el mismo orden para ordenar las columnas e iterativamente se va siguiendo este proceso hasta que los coeficientes estén ya reordenados.

Esta última fase nos dará una matriz en la que los 1 están agrupados y será visualmente fácil encontrar las células propuestas por el sistema. En el anexo se encuentra la resolución del problema mediante este método.

(1) DESDE $m=1$ HASTA $m=M$

$$c_m = \sum_{p=1}^P 2^{P-p} * a_{mp}$$

FIN DESDE

Reordenar filas en orden no-creciente de $c_m \rightarrow A'$

(2) DESDE $p=1$ HASTA $p=P$

$$r_p = \sum_{m=1}^M 2^{M-m} * a_{mp}$$

FIN DESDE

Reordenar filas en orden no-creciente de $r_p \rightarrow A''$

(3) Reordenar columnas en orden no-creciente de $r_p \rightarrow A''$

Si nueva matriz $A'' = A$ ENTONCES fin

SI NO, ENTONCES $A'' \rightarrow A$ e ir a (1)

Inconvenientes:

- El exponente de 2 no puede ser mayor a 48, por lo que en matrices demasiado grandes no se podría aplicar este método.
- La solución que se propone depende de la forma en la que esté ordenada la matriz inicial las iteraciones, por lo que hay variables que no dependen del sistema que afectarán a la solución.

- Es muy eficaz para ordenar las células en el rincón noreste, pero para el resto de localizaciones no es un método muy preciso.

b) DCA (Direct Clustering Algorithm)

Al igual que el anterior es un método iterativo. Sigue una dinámica parecida, con la diferencia de que en este método no se utilizan los coeficientes. Se suman los valores de las filas, creando un coeficiente para cada una de ellas y se ordena. Posteriormente se hace lo mismo con las columnas hasta que la reordenación no sea necesaria.

(1) DESDE $m=1$ HASTA $m=M$

$$n_m = \sum_{p=1}^P a_{mp}$$

(Calcular número de 1's de cada fila)

FIN DESDE

Reordenar filas en orden no-decreciente de $n_m \rightarrow A$

(2) DESDE $p=1$ HASTA $p=P$

$$n_p = \sum_{m=1}^M a_{mp}$$

(Calcular número de 1's de cada columna)

FIN DESDE

Reordenar columnas en orden no-creciente de $n_p \rightarrow A$

(3) DESDE $p=1$ HASTA $p=P$

Mover las filas con 1's arriba, formando un bloque de filas que no se mueven más

FIN DESDE

Si nueva matriz $A' = A$, ENTONCES fin

(4) DESDE $m=1$ HASTA $m=M$

Mover las columnas con 1's a la izquierda, formando un bloque de columnas que no se mueven más

FIN DESDE

Si nueva matriz $A' = A$, ENTONCES fin

SI NO, ENTONCES ir a (3)

El principal inconveniente, con en el método ROC, es que la solución depende de la matriz inicial.

c) CIA (Cluster Identification Algorithm)

Es un método que busca reducir a 0 los movimientos de piezas entre células diferentes (intercelulares), para ello se buscan las agrupaciones más pequeñas posibles, teniendo en cuenta que debe cubrir muchas rutas diferentes. En este caso no tiene mucho sentido la aplicación de este método, porque todas las máquinas, al menos una vez, comparten ruta con el resto, por lo que la asociación sería una sola célula de trabajo.

Este caso extremo no se considera fabricación celular, ya que se compone de una sola línea de trabajo.

La casuística que se da en el caso a estudiar es uno de los principales inconvenientes de este método.

3.3.1.2 Métodos de agrupamiento jerárquico basados en coeficientes de similitud

Este método permite una agrupación más precisa, ya que utiliza coeficientes de similitud basados en los datos de la matriz de incidencia para agrupar las células. También hay varias técnicas, que se explicarán posteriormente. Cada una utiliza diferentes formas de crear u ordenar los coeficientes, aunque, como se verá a continuación los resultados serán similares.

Una de las principales ventajas de esta técnica es que va agrupando las células por pasos, proporcionando un porcentaje de similitud para cada uno de estos pasos. Esto es una información que ayudará a tomar la decisión de cuántas células formar, dependiendo de las exigencias de la empresa.

Son métodos que agrupan objetos similares en conjuntos; si se agrupan máquinas hablamos de células y si se agrupan piezas hablamos de familias. La agrupación se realiza mediante una matriz de incidencia, con la que se calculan coeficientes que cuantifican la similitud entre las máquinas.

Los diferentes métodos que se presentan a continuación se corresponden con diferentes formas de calcular estos coeficientes.

a) *SLCA (Single Linkage Clustering Algorithm)*

El coeficiente de similitud que se usa es el de Jaccard y se calcula con la siguiente fórmula:

$$S_{mn} = \frac{a}{a + b + c}$$

Siendo:

- (m, n): Relación entre dos máquinas.
- (a): Número de piezas que visita ambas máquinas.
- (b): Número de piezas que solo visita n.
- (c): Número de piezas que solo visitan m.

Como resultado de aplicar esta fórmula a todas las combinaciones de máquinas, se obtiene la matriz representada. Un valor alto significa que tienen una gran similitud y uno pequeño representaría que tienen pocas piezas que en su ruta tengan las dos máquinas. De esta misma forma, un 1 en el coeficiente de similitud significaría coincidencia total, es decir todas y cada una de las piezas que pasan por la máquina n, también pasan por la máquina m y un 0 en el coeficiente de similitud representa que no hay ninguna pieza que pase por ambas máquinas en su recorrido.

Esta decisión resultaría en un modelo en el que se maximizan las similitudes, ya que busca que las máquinas que tienen coeficientes de similitud altos queden agrupadas.

b) *CLCA (Complete Linkage Clustering Algorithm)*

Sigue el mismo proceso que el SLCA, con la única diferencia de que, al recalcularse los valores, en vez de tomar el valor máximo de entre las máquinas que componen la célula y la otra máquina con la que se está calculando el coeficiente, se coge el valor mínimo.

Posteriormente, a la hora de tomar la decisión de qué máquinas agrupar, se tomaría el coeficiente con mayor similitud.

Este método, busca minimizar las no similitudes, ya que a la hora de tomar la decisión de qué coeficiente tomar para la posterior decisión, se toma el peor caso, es decir, el coeficiente menor.

c) *ALCA (Average Linkage Clustering Algorithm)*

Este caso es muy parecido a los dos anteriores, con la diferencia de que, en vez de coger el máximo o el

mínimo, se utiliza la media de las dos máquinas. Aunque, de la misma forma que en los dos casos anteriores, una vez creada la matriz de coeficientes de similitud, se busca siempre el porcentaje de similitud mayor.

Este método, por lo tanto, da una visión en la que pondera de la misma forma las similitudes de las diferentes máquinas que forman la célula y, por lo tanto, una visión del sistema más balanceada.

d) LCCA (Linear Cell Clustering Algorithm)

Este método utiliza el coeficiente de similitud C_{mn} , que tiene en cuenta diversos factores.

$$C_{mn} = \sum_{p=1}^P \delta(a_{mp}, a_{np}) : \delta(a_{mp}, a_{np}) = \begin{cases} P - 1 & \text{si } a_{mp} = a_{np} = 1 \\ 1 & \text{si } a_{mp} = a_{np} = 0 \\ 0 & \text{si } a_{mp} \neq a_{np} \end{cases}$$

Una vez creados los coeficientes para cada par de máquinas, se agrupan en una célula las de mayor coeficiente y se vuelven a calcular estos.

3.3.2 Métodos basados en modelos matemáticos de optimización.

Los métodos basados en modelos matemáticos son los más complejos, ya que requieren de un planteamiento de modelo, de su resolución y posteriormente del análisis de los datos. Otra de las grandes dificultades del modelo es que hacen falta dos modelos, uno para la formación de células y otro para la formación de familias y su asignación a las diferentes células. Se verán 2 modelos diferentes, con diferentes funciones objetivo, que posteriormente se resolverán en el apartado 4 dando diferentes posibilidades de escenarios.

a) Modelo P-MEDIANA

Este método se basa en uno de los problemas básicos de optimización, en este problema se tienen diferentes datos, localizados en el plano (en el caso de dos variables), se busca colocar puntos en el plano, minimizando la distancia entre los puntos a localizar y los datos. Hay diferentes variantes de este problema, por ejemplo, poniendo como restricción el número de puntos a localizar o poniendo como restricción una distancia que ninguno de los puntos puede superar.

Esto se puede aplicar al modelo de asignación de piezas a células mediante las siguientes restricciones:

1. Asegura que cada pieza se asigna a una única familia

$$\sum_{q=1}^P x_{pq} = 1 \quad P = 1, \dots, P$$

2. Obliga a que se formen F (número previamente establecido) familias.

$$\sum_{q=1}^P x_{qq} = F$$

3. Obliga a que si una pieza q no es mediana, no se le asignen piezas.

$$x_{pq} \leq x_{qq} \quad p, q = 1, \dots, P$$

Y la siguiente función objetivo, que busca maximizar el sumatorio de coeficientes de similitud:

$$Max \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P S_{pq} * x_{pq}$$

Siendo $S_{pq} = \delta(a_{ip}, a_{iq}) : \delta(a_{ip}, a_{iq}) = \begin{cases} 1 & \text{si } a_{ip} = a_{iq} \\ 0 & \text{si } a_{ip} \neq a_{iq} \end{cases}$

Después de utilizar este método, sería necesario asignar las máquinas a estas familias mediante un sencillo método de optimización.

b) Modelo de asignación

Modelo de asignación para formación de células:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S_{mn} * x_{mn} \\ \sum_{m=1}^M x_{mn} &= 1 \quad m = 1, \dots, M \\ \sum_{m=1}^M x_{mn} &= 1 \quad n = 1, \dots, M \end{aligned}$$

Modelo de asignación para formación de familias:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P S'_{pq} * x_{pq} \\ \sum_{q=1}^P Y_{pq} &= 1 \quad p = 1, \dots, P \\ \sum_{p=1}^P Y_{pq} &= 1 \quad q = 1, \dots, P \end{aligned}$$

Este método plantea el problema como un modelo matemático de optimización. Para ello, se consideran diferentes restricciones y una función objetivo, que busca maximizar las coincidencias, al mismo tiempo que minimiza las no coincidencias de ruta dentro de una misma célula.

3.3.3 Aproximaciones basadas en planes de procesos.

Uso de aproximaciones que directamente analizan los planes de procesos para identificar las particiones y familias de máquinas. Para utilizar este método es importante recoger una amplia cantidad de datos e información de la empresa, en este estudio de planta no se utilizará este método debido a la falta de datos, aunque es una buena aproximación a la hora de formar las células de trabajo.

3.3.4 Aproximaciones intuitivas y visuales

Esta técnica es muy arriesgada, ya que precisa de alguien que conozca muy bien la empresa, sus productos y sus procesos. Con toda esta información y experiencia y con sistemas no muy complejos a veces es más útil y práctico utilizar este procedimiento, pero es también el método menos preciso, ya que no se basa en estudios, ni está amparada por datos objetivos y cuantificables. Está basada en la información, muchas veces sesgada y poco objetiva de la persona responsable de tomar las decisiones en cuanto a células.

En algunos casos, en los que se conoce muy bien el funcionamiento de la empresa y tanto las células como las

familias a formar son muy claras, este método es útil, ya que no hace es necesario el estudio anteriormente propuesto.

4 EMPRESA, PRODUCTO Y PROCESO

A continuación, se va a explicar el caso de estudio. Se explicará el proceso que se realiza en esta planta y sus características, la estructura de la empresa y su funcionamiento, así como las relaciones entre diferentes departamentos. También se hará un pequeño resumen de su gestión y se explicará de dónde se han sacado los datos a utilizar en el método. Debido al tipo de demanda de esta empresa es muy complicado elaborar un buen sistema de planificación, por ello veremos las posibles soluciones y las herramientas que se creen más útiles para este modelo de empresa.

4.1 La empresa y su estructura.

La empresa se llama Metal Improvement Company, es una compañía americana, con más de 50 sucursales por todo el mundo, se dedica a un tratamiento superficial de diferentes tipos de piezas llamado *shotpeening* y los clientes son principalmente de la industria aeronáutica y automovilística.

Una de las complicaciones en esta empresa es la amplia gama de piezas a las que se le da tratamiento, siendo éstas muy diferentes entre sí tanto en forma, tratamiento y documentación. Esto hace más difícil un sistema de gestión eficiente, ya que tiene que ser práctico y adaptado a cada tipo de pieza de las que se trabajan en la planta. Por lo tanto, un mismo sistema debería abarcar tanto el formato de producción aeronáutico (órdenes de trabajo con pocas piezas y una alta exigencia en la trazabilidad) como al automovilístico (órdenes de trabajo con gran cantidad de piezas y generación de documentos diferentes).

Para encontrar una solución a esta metodología de producción tan diversa se planteó crear una base de datos personalizada, adaptándose a las necesidades de la empresa. Se contrató a una empresa informática para llevar a cabo dicho sistema de gestión. Gracias a este nuevo sistema de gestión se puede obtener mayor información de la empresa, que se espera implicará un mayor control de los procesos que en ella se realizan. Uno de las informaciones que se recogen en esta base de datos son los tiempos de procesos, que serán vitales para este estudio. Por otro lado, también se espera reunir otra información referente a los plazos de análisis de calidad o al seguimiento de las incidencias, pero esta información queda fuera de este estudio.

Los principales sectores con los que trabaja la empresa son el naval, el aeronáutico y el automovilístico. Cada sector tiene unos requisitos, especificaciones y procedimientos diferentes. Por ejemplo, la trazabilidad y la precisión exigido en el sector aeronáutico son mucho mayores que en los demás sectores. O la cantidad de piezas que vienen en una orden de trabajo de la industria automovilística es mucho mayor que en la industria naval, o aeronáutica (como norma general).

4.2 Departamentos y responsabilidades.

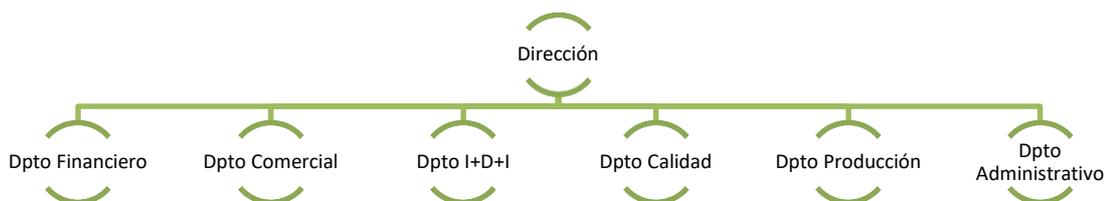


Ilustración 4.-Estructura jerárquica personal

La empresa objeto de estudio es una PYME con 15 trabajadores en plantilla, por lo que la comunicación entre

los distintos responsables de departamento se hace mucho más sencilla.

- **Administrativo:** Se encarga de recepcionar el producto, elaborar los documentos pertinentes e introducir la información del pedido en la base de datos. Al finalizar el procesado, este departamento también es el encargado de facturarlos, por lo que el contacto con producción es muy importante. También es vital el contacto con el departamento de calidad, debido a que cualquier irregularidad debe ser comunicada al cliente. En caso de no conformidades sería este departamento, o dirección el que se encarga de informar al cliente.
- **Producción:** Para este estudio la relación con el departamento de producción es vital. Se encarga de tomar las decisiones en cuanto a la producción, cuándo se realizarán los cambios de bola, los turnos de los operarios o la prioridad de los artículos que entran en producción.

Para este estudio es vital recoger algunos datos de producción, siendo los más importantes:

- Control de tiempos
- Asignación de operarios
- Asignación de piezas a máquina y secuencia de éstas.

Con respecto al procedimiento de documentación, este departamento se encarga de asociar cada part-number o referencia que viene en el pedido con una hoja de proceso ya existente, o en su defecto, crear una nueva hoja de proceso.

Una vez asociada la hoja de proceso al part-number se debe crear una orden de trabajo, que contiene la información necesaria para realizar las diferentes operaciones que van asociadas al tratamiento a realizar. También se anotará en esta orden de trabajo la información necesaria para el control y la gestión posterior, como por ejemplo cualquier irregularidad, qué operario la ha realizado, si ha tenido conformidad la primera vez que se ha realizado el proceso o se ha tenido que repetir, o cualquier información adicional.

Se plantea a medio plazo una informatización de esta parte del proceso, para reducir el tiempo de recogida de datos. El planteamiento es hacerlo mediante un sistema de picadas, lo que facilitaría también su posterior análisis y el cálculo de los diferentes indicadores (en este caso KPIs).

- **Diseño:** Su tarea principal es crear los útiles que se emplean para el enmascarado de las piezas, mediante una impresora 3D, fabricación en empresas externas o un sistema de pegatinas, dependiendo de las características de la pieza y las necesidades del tratamiento. En este tipo de industria los útiles son necesarios debido a que, por especificaciones del cliente, es normal que el tratamiento se le de a la pieza solo en las zonas que en su ciclo de vida estarán sometidas a fuertes vibraciones o cargas.
- **Calidad:** Este departamento toma gran importancia en la elaboración de informes y para todas las anomalías y no conformidades de las piezas. También es el encargado de las modificaciones del plan de mantenimiento preventivo, así como de la generación de documentos acreditativos de calidad en la base de datos.
- **Mantenimiento:** Encargado de cumplir los requisitos del plan de mantenimiento preventivo de las máquinas, así como de reparar todas las averías y mantenimiento correctivo que sean necesarios para el mejor funcionamiento de la planta.

4.3 Proceso.

Esta empresa está especializada en un proceso de tratamiento superficial de la pieza que, mediante la proyección de pequeñas bola consigue mejorar la resistencia del material y alargar su ciclo de vida. A continuación se explica con más detalle el funcionamiento del proceso.

4.3.1 Concepto

El *shotpeening* es un proceso creado para mejorar la resistencia a fatiga de componentes que, ya sea por su función o por su localización en el producto final, está sometido a altas tensiones alternas [5].

Durante la creación de la pieza, procesos como el fresado, el doblado o el termotratado, provocan tensiones residuales de tracción, el proceso de shotpeening, mediante la proyección de pequeñas bolas de metal o vidrio, transforma esas tensiones de tracción en tensiones de compresión. Mientras que la tensión de tracción reduce el ciclo de vida de la pieza, la tensión de compresión no solo lo alarga, también mejora la capacidad de carga de ésta y reduce las grietas por corrosión provocadas por el esfuerzo.

Este proceso crea una compresión residual en la superficie de la pieza a tratar, es especialmente útil, para los componentes que soportarán cargas cíclicas y repetitivas.

Tipos de procesos:

- **Modelado mediante granallado de compresión:** Este proceso curva la capa superficial del componente que se trata, mediante compresión y extensión de la capa superficial.
- **Corrección de la distorsión:** Este proceso se denomina peen forming, su objetivo es corregir cualquier deformidad, creando una planitud perfecta en el componente. Se hace mediante granallado de compresión, que estira y comprime un área localizada de la pieza. Esta deformación se produce muchas veces por los procesos de formación de la pieza que implican calor o mecanizado.

4.3.2 ¿Qué es el shotpeening?

El shotpeening es un proceso de trabajo en frío, que consiste en proyectar granalla (partículas esféricas metálicas, de vidrio o cerámicas) contra una superficie, con la fuerza suficiente para generar la deformación plástica de la misma. De esta forma, se introduce un campo de tensiones residuales de compresión, que modifica las propiedades mecánicas del metal.

Las tensiones residuales de compresión (de las que se hablaba en el apartado anterior) en la superficie de la pieza contribuyen a evitar que las pequeñas grietas que se forman en el material se propaguen a través de éste. Por lo tanto, este entorno compresivo generado por el tratamiento se vuelve mucho más resistente a la rotura.

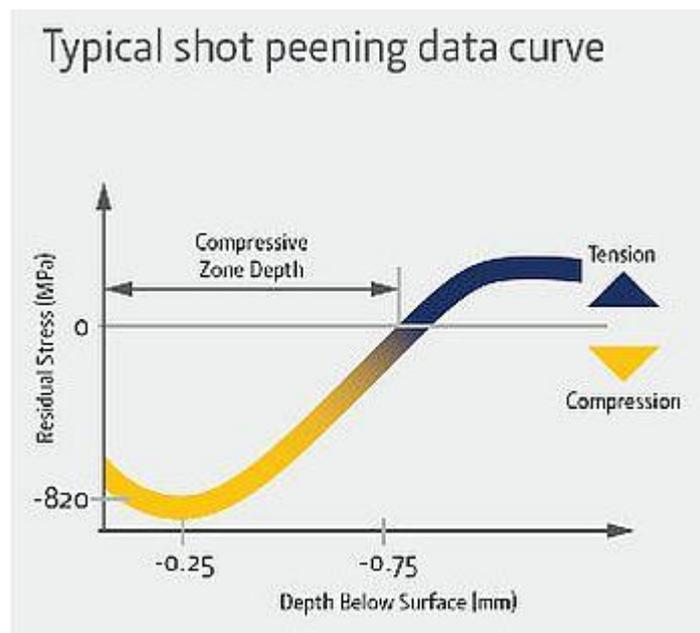


Ilustración 5.- Curva de tensión típica

Formación de las tensiones de compresión: cada partícula proyectada sobre el metal genera una pequeña huella

en la superficie de la pieza. La suma de todas las pequeñas huellas que forman cada partícula proyectada, crea una capa superficial en la pieza, en la que el material está comprimido, esta capa hace la función de un revestimiento en la pieza, que hace que el material quede endurecido.

Este proceso está ampliamente estudiado y comprobado, por lo tanto, sus ventajas reconocidas en muchos ámbitos. Cada vez se utiliza en más sectores, aunque son típicamente más utilizados en el sector aeronáutico o para piezas de motores de diferentes tipos, en definitiva, piezas que tiene una vida útil relativamente baja debido a las vibraciones o tensiones que soporta.

4.3.3 Control del proceso.

Las intensidades que se aplican en el proceso deben ser bastante precisas, debido a que dependiendo de las características iniciales de la pieza (tipo de material, procesos a los que ha sido sometido u otras variables) se precisa un tratamiento diferente.

Para llevar un control de los efectos del shotpeening en la pieza se utiliza una probeta Almen; consiste en una pequeña lámina de metal que, después de ser sometida al tratamiento presenta una leve deformación, con la que se podrá medir la intensidad a la que ha sido sometida. Para que esta medición sea precisa, la probeta Almen debe estar compuesta de acero de muelle y cumplir unas estrictas tolerancias tanto de dureza como de planeidad. Para medir la curvatura de la probeta se utiliza un medidor Almen, que proporciona la amplitud de la curva, con la que posteriormente se podrá calcular la energía del haz de granalla. Esta energía depende, tanto de la velocidad de proyección e la bola, tanto como de la masa de la granalla.

Se considera que se ha alcanzado la saturación de la pieza cuando al duplicar el tiempo de exposición al tratamiento, la flecha o deflexión de la probeta Almen se incrementa en un porcentaje igual o inferior al 10%.

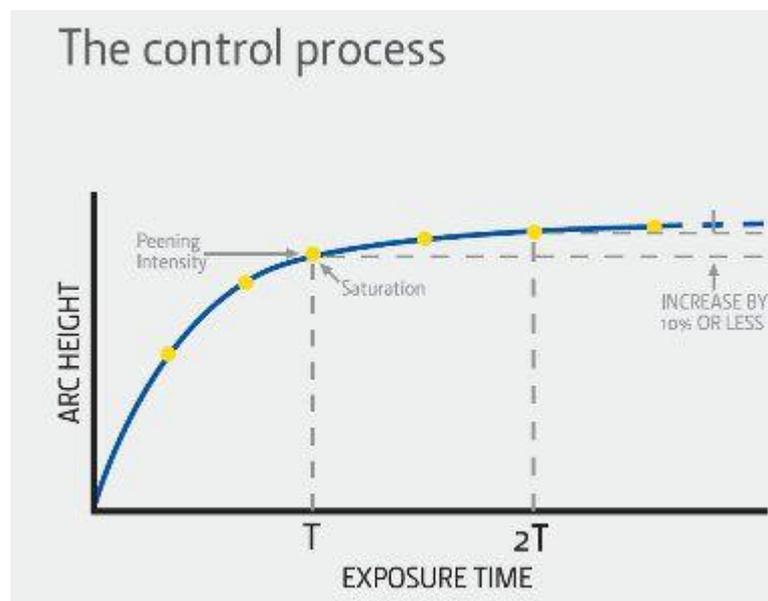


Ilustración 6.- Control del proceso

4.3.4 Tipos de bola utilizados en la planta a estudiar.

Para diferentes tipos de proceso se utilizan diferentes tipos de bola, dependiendo de el tipo de tratamiento que necesite la pieza, ya sea por el tipo de material, el tipo e intensidad de las tensiones que va a utilizar en el futuro o el tipo de normas que debe cumplir la pieza (normalmente determinadas por el tipo de industria, o por la utilidad de la pieza en el objeto final).

Por ejemplo, cuando se proyecta con bola de metal, la pieza que se trató será más resistente que al tratarse con

vidrio. Por otro lado, al tratarse con vidrio, el acabado superficial de la pieza resultante será bastante más liso. También se clasifican los tipos de bola por tamaño, así mismo, el tamaño de bola dará un resultado diferente en cuanto al acabado.

Los tipos de bola principales son: S230, S330r, Agb-18, S550r, Agb-25, S70 h, Agb-35, Agb-6, S110r, Agb-50 y S170h.

Como se ha comentado los tipos de bola para diferentes piezas pueden ser diferentes, sin embargo, la máquina que los procesa es la misma. Por lo tanto, en este caso se necesitará realizarle un setup a la máquina, cambiando la bola por la correspondiente a la que se quiere utilizar. Este cambio de bola es bastante largo, por lo que siempre se busca minimizar el número de cambios.

Para realizar el Setup se deben realizar los siguientes pasos:

- Parada de máquina.
- Retirada de bola.
- Limpieza del sistema de propulsión del caudal de la máquina, es mucho más exhaustiva esta limpieza en el caso de que el cambio de bola sea de una de metal a una de vidrio.
- Introducción de la bola nueva.
- Puesta en marcha de la máquina

4.3.5 Intensidades más utilizadas.

Para el procesado, depende de las exigencias de tratamiento se utilizan diferentes intensidades, en este caso, el cambio de intensidad es mucho más sencillo que el cambio de bola. En este caso, bastaría con cambiar las especificaciones en los controles de la máquina y ésta aplicará la intensidad deseada.

Las intensidades más utilizadas son: 6-10 a, 10-14 a, 6 a, 40-60 psi, 3-4 bar, 6-10 n, 8-12 n, 5-18n, 12-14 a y 7-9 a.

4.3.6 Máquinas utilizadas en la planta a estudiar.

La empresa se compone de 6 máquinas diferentes, todas ellas realizan el mismo proceso de tratamiento superficial de la pieza, sin embargo, tienen diferentes características, como tamaño de las piezas que pueden entrar en ella, o ángulo de las boquillas, etc... que hace que cada máquina se utilice en un determinado tipo de part-number.

1. **Spar:** Es la máquina de mayor tamaño, en consecuencia, la que admite piezas con una diversidad mayor de forma y dimensiones. En el mismo procesado pueden entrar varias piezas de un mismo pedido y también es normal que en el mismo procesado entren piezas de pedidos diferentes.
2. **ID:** Es una máquina pequeña, se utiliza para trabajos que necesitan mayor precisión o que tienen un diseño que dificulta la sujeción en otro tipo de máquinas.
3. **613:** Es la única máquina en la planta de la que hay dos unidades, ya que la carga de trabajo que soporta es muy elevada. Tiene una capacidad de entre unas 10 y 12 piezas.
4. **Carrusel:** Es una máquina con un sistema rotativo, que tiene una capacidad de entre unas 5 y 10 piezas, depende del tamaño de éstas, y se usa principalmente para el tratamiento de piñones, ya que la forma de las boquillas permite que todos los recovecos de la pieza sean tratados.
5. **Manual 06:** La cabina Manual 06 se corresponde con una pequeña sala preparada para el proceso. En ésta se encuentra una manguera que dispara el caudal a alta presión de bola necesario para el proceso. Esta máquina suele estar rellena con el tipo de bola de metal más utilizado.
6. **Manual 09:** Como en el anterior caso, esta máquina es una pequeña sala preparada para el proceso de shotpeening. Esta máquina suele contener el tipo de bola de vidrio más utilizado. Para cambiar el tipo de bola de la máquina se tendría que realizar un proceso de setup. En este caso, como la máquina manual

es un módulo que, por sus características requiere de una cantidad de bola mucho mayor, se intentan realizar los mínimos cambios ya que es un proceso complejo que requiere de un gasto de recursos importante. Tanto por el tiempo del operario para realizarlo, como por la cantidad de material que se necesita.

4.4 Recogida de datos

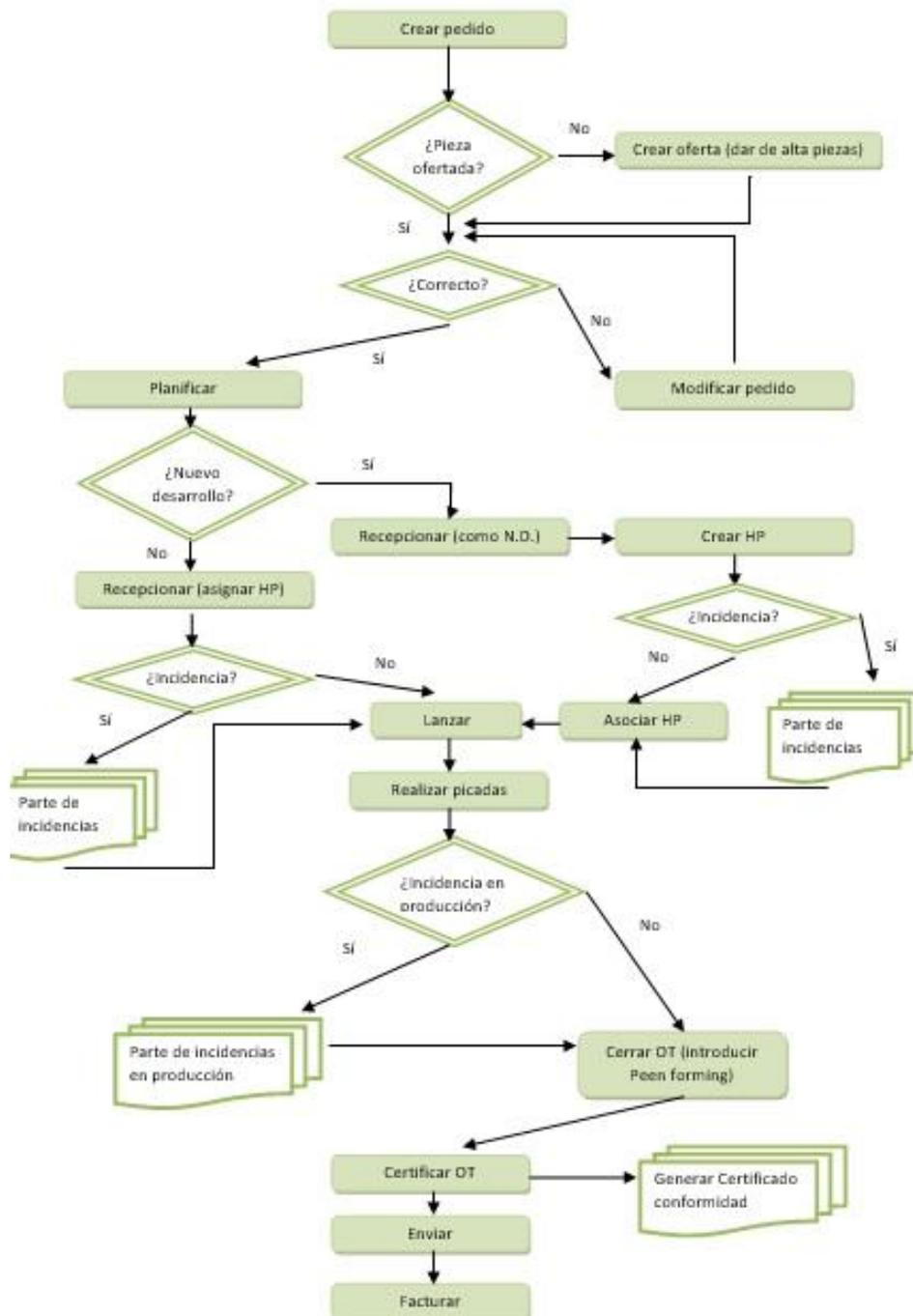


Ilustración 7.- Diagrama documentación

En este diagrama están resumidas todas las acciones que son necesarias realizarle a una pieza desde el momento en que llega el pedido a la planta hasta el momento en que se factura ese proceso. Se recogen todas las casuísticas posibles que se pueden dar durante el proceso, también se muestra los documentos que hay que generar en cada parte del proceso.

En este caso se ha realizado el estudio sacando la información de las hojas de proceso (HP). Como observamos en el diagrama, la hoja de proceso es un documento asociado a las referencias que vienen a la planta de trabajo. Una misma hoja de proceso puede estar relacionado con varias referencias. En el seguimiento de los procesos y el control que se realiza en la empresa se recogen ambos campos, pero como para el estudio no es necesario saber la referencia, ya que solo es importante el número de piezas y la ruta que siguen, se pueden considerar directamente las hojas de proceso asociadas como referencias.

En la siguiente imagen observamos cómo se estructura la recogida de datos en la empresa, se recoge tanto la información del part-number de la pieza, como la hoja de proceso asociada.

ID	Pedido	Fecha	No	Cliente	Ref.	Part-Number	Cant	Hoja Proc.	O. T.	Estado	F. Fin	F. Envío	PRICE	TOTAL	Factura
1	P16/1740-1	21/12/2016	Sí	MPB-Aerosp.	2200000233APAA	95-33213-1301A01	1	S/0023	16-3656	Terminada	28/12/2016	30/12/2016	21,75 €	21,75 €	17-0012
2	P16/1740-2	21/12/2016	Sí	MPB-Aerosp.	2200000234APBA	95-33213-1302A02	1	S/0023	16-3656	Terminada	28/12/2016	30/12/2016	21,75 €	21,75 €	17-0012
226	PC17/0093-1	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	2506000027APAA	550-02728-405NU	1	S/0714	17-0115	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	11,90 €	17-0069
227	PC17/0093-2	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	2506000028APAA	550-02728-406NU	1	S/0714	17-0115	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	11,90 €	17-0069
228	PC17/0093-3	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP16010058	550-02725-406NU	4	S/0714	17-0116	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	47,60 €	17-0069
229	PC17/0093-4	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000312	550-02728-405NU	7	S/0714	17-0117	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	83,30 €	17-0069
230	PC17/0093-5	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000313	550-02728-405NU	8	S/0714	17-0117	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	95,20 €	17-0069
231	PC17/0093-6	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000314	550-02728-406NU	7	S/0714	17-0117	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	83,30 €	17-0069
232	PC17/0093-7	20/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000315	550-02728-406NU	8	S/0714	17-0117	Terminada	24/01/2017	26/01/2017	11,90 €	95,20 €	17-0069
335	PC17/0126-1	27/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP16008386	95-33213-1401A01	2	S/0071	17-0185	Terminada	31/01/2017	02/02/2017	12,90 €	25,80 €	17-0099
336	PC17/0126-2	27/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP16010372	95-25630-1001A01	1	S/0066	17-0186	Terminada	31/01/2017	02/02/2017	28,60 €	28,60 €	17-0099
337	PC17/0126-3	27/01/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000324	550-02728-406NU	2	S/0714	17-0187	Terminada	31/01/2017	02/02/2017	11,90 €	23,80 €	17-0099
410	PC17/0163-1	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP16010344	95-23063-0103A01	1	S/0051	17-0237	Terminada	06/02/2017	15/02/2017	6,60 €	6,60 €	17-0120
411	PC17/0163-2	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000488	550-01238-003	2	S/0441	17-0238	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	18,20 €	36,40 €	17-0100
412	PC17/0163-3	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000490	550-01238-004	2	S/0441	17-0238	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	18,20 €	36,40 €	17-0100
413	PC17/0163-4	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000496	550-01239-003	3	S/0441	17-0238	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	18,20 €	54,60 €	17-0100
414	PC17/0163-5	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000614	550-09447-005	3	S/0390	17-0239	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	15,30 €	45,90 €	17-0100
415	PC17/0163-6	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000658	550-09552-004	11	S/0406	17-0240	Terminada	06/02/2017	15/02/2017	12,50 €	137,50 €	17-0120
416	PC17/0163-7	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000486	550-01235-004	2	S/0429	17-0241	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	18,20 €	36,40 €	17-0100
417	PC17/0163-8	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000631	550-09442-009	4	S/0398	17-0242	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	15,70 €	62,80 €	17-0100
418	PC17/0163-9	03/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000494	550-01239-004	2	S/0441	17-0238	Terminada	03/02/2017	07/02/2017	18,20 €	36,40 €	17-0100
553	PC17/0188-1	08/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000470	550-01281-003	3	S/0410	17-0286	Terminada	13/02/2017	15/02/2017	31,80 €	95,40 €	17-0154
554	PC17/0188-2	08/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000468	550-01280-003	4	S/0410	17-0286	Terminada	13/02/2017	15/02/2017	31,80 €	127,20 €	17-0154
555	PC17/0188-3	08/02/2017	Sí	MPB-Aerosp.	OP17000474	550-01282-005	4	S/0410	17-0287	Terminada	13/02/2017	15/02/2017	31,80 €	127,20 €	17-0154

Ilustración 8.- Recogida de datos de sistema de gestión

Debido al elevado número de referencias y su clara asociación por hojas de proceso, se ha decidido utilizar la numeración de hojas de procesos directamente como referencias de piezas, simplificando así el modelo, ya que se reducen las referencias a utilizar y no se pierde información, ya que los parámetros a estudiar de los part-numbers son iguales.

4.5 Layout de la planta.

La distribución actual de la planta sigue el tipo job shop, es decir, cada máquina es considerada una célula de trabajo independiente. La empresa se distribuye en diferentes sectores, ya que en la misma planta de procesado se encuentran también los despachos de los responsables de cada departamento y una zona de almacenaje y tratamiento corrosivo. Este tratamiento corrosivo se considera un proceso diferente y poco significativo con respecto al total de la demanda, por este motivo se ha dejado fuera del estudio, manteniendo su ubicación actual.

4.5.1 Zona de administración de despachos.

En la siguiente imagen se muestra el layout actual, que se compone de diferentes áreas. Lo primero que nos encontramos sería la zona de administración y despachos, correspondiendo con la entrada de la planta. A su izquierda se deja un paso que accede directamente a la planta, en la que se realiza la recepción de piezas y la descarga de todo tipo de material de grandes dimensiones. En el estudio que posteriormente se realizará del layout no se tendrán en cuenta estas zonas, ya que se trabajará directamente con la zona de la planta correspondiente al procesado de las piezas.

También se encuentra aquí el laboratorio de pruebas, donde se realizan análisis. Se realizan dos tipos de pruebas:

- Análisis de las piezas ya tratadas, para comprobar que el proceso ha sido eficaz y ha cubierto toda la zona deseada.

- Análisis de la calidad de bola de las máquinas; en el momento en el que la bola esté desgastada y no cumpla los parámetros exigidos por calidad, se deberá proceder al cambio de bola en la máquina que se está examinando.

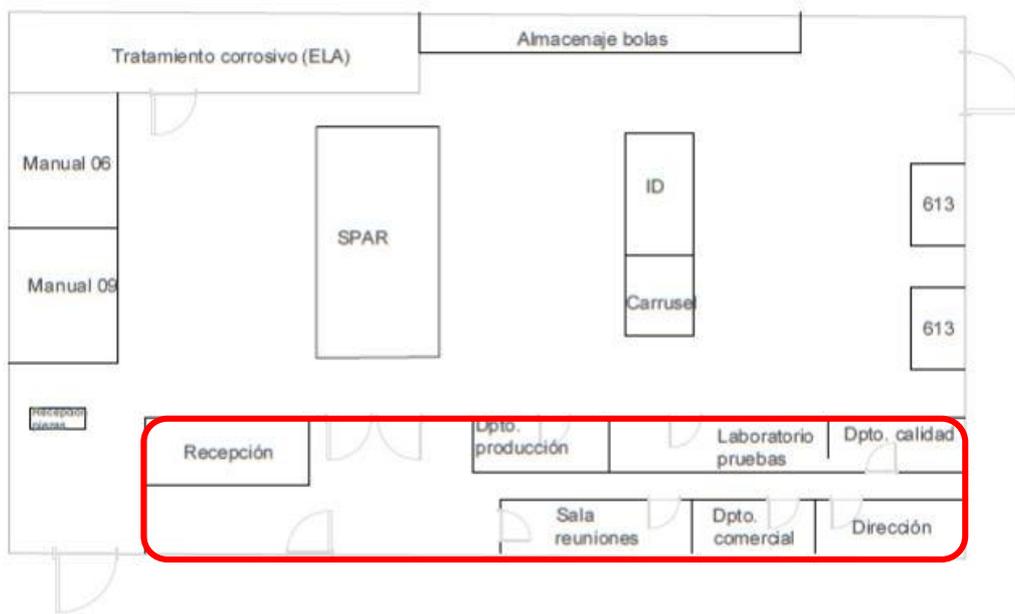


Ilustración 9.- Layout zona despachos

4.5.2 Zona de procesado

La zona de procesado se correspondería con las máquinas que realizan el proceso de shotpeening, en el que se centrará este estudio, ya que es la actividad principal de la empresa.

Como anteriormente se ha comentado, cada una está destinado a un tipo de pieza diferente, ya sea por el tamaño, por la forma o la dirección de las boquillas, o por el tipo de bola con el que se rellena.

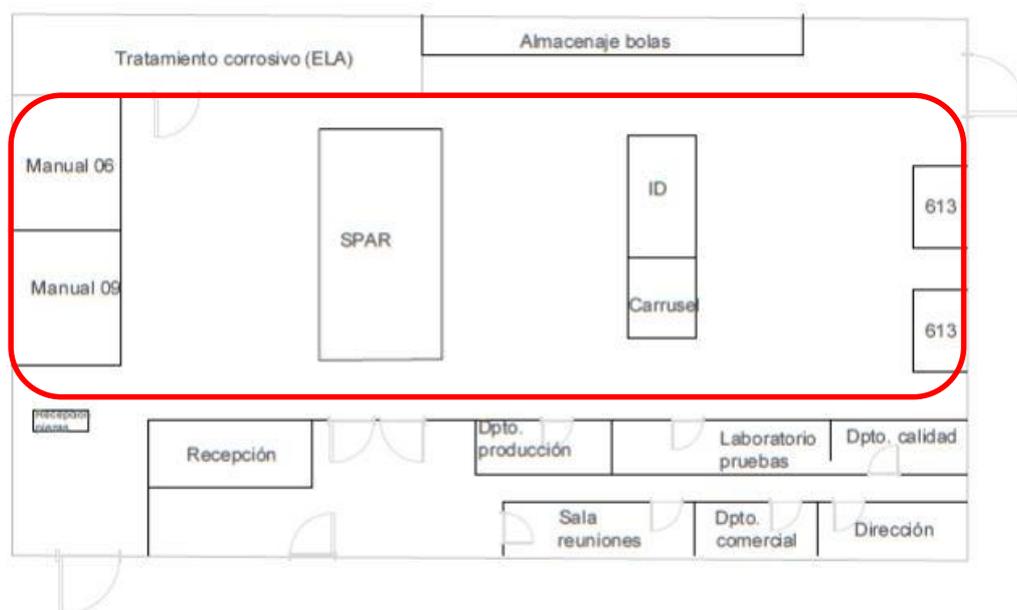


Ilustración 10.- Layout zona de procesado

4.5.3 Tratamiento químico en E.L.A. y almacén.

En este almacén se recogen las bolas con las que posteriormente se realizará el proceso. Las bolas deben tener un tamaño determinado y al proyectarlas contra las piezas a tratar éstas se rompen o deforman. Para cumplir con los parámetros exigidos, se elimina parte de la carga de bola de la máquina y se repone con bola nueva, esto hará que el porcentaje de bola que cumple los parámetros exigidos aumente considerablemente (para cumplir las normativas de calidad debe estar en torno a un 85%).

Por otro lado, en esta zona de la planta, se encuentran unas cubetas muy grandes, que le dan un tratamiento a la pieza. Se utilizan con piezas que necesitan un acabado muy liso, son piezas como piñones u otro tipo de anclajes, que van a soportar mucha fricción. Este tratamiento se hace mediante unos productos corrosivos, acompañado por un movimiento circular que mueve las piezas, rozándolas con los productos corrosivos hasta cumplir con el resultado deseado.

Como se ha comentado anteriormente, el estudio no considera mover las localizaciones de almacenaje ni de tratamiento corrosivo, principalmente, porque con la distribución actual se ubican en la zona más alejada de la zona de carga y descarga, por lo que no será una buena localización para las máquinas de procesado.

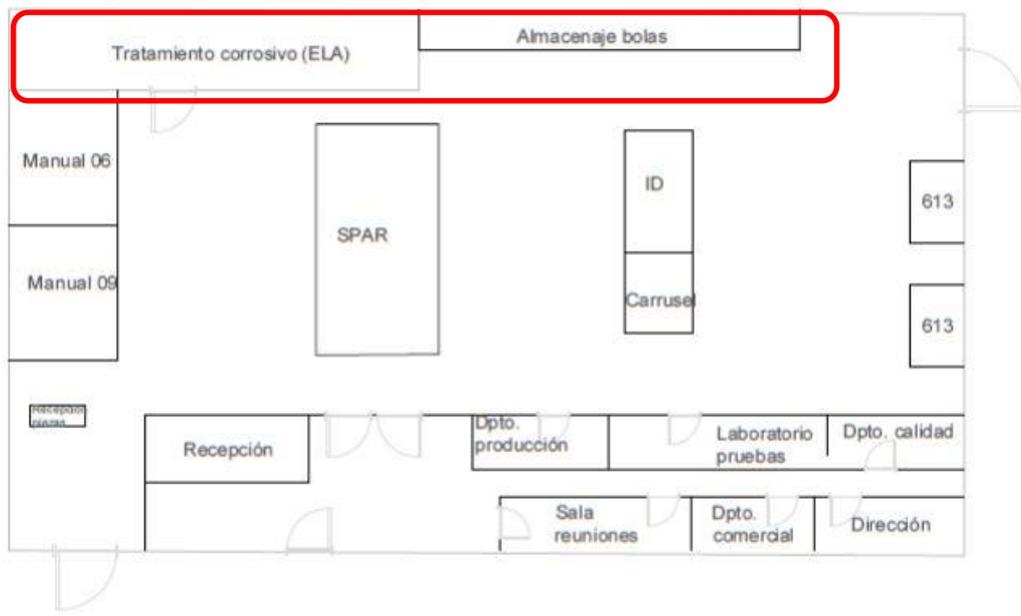


Ilustración 11.- Layout E.L.A. y almacén

5 AGRUPACIÓN EN CÉLULAS: CASO PRÁCTICO

En este apartado se ejecutarán algunos de los métodos explicados en el apartado 3, llevando a la práctica las diferentes heurísticas, se considerarán varias opciones de distribución en células, para, posteriormente escoger la que más se ajusta al modelo.

Para ello, se necesitan los datos recogidos en el Excel anteriormente mostrado. Se han cribado los datos, hasta obtener solo los necesarios, creando una matriz binaria, en la que un 1 en la posición (1,1) significará que la pieza 1 debe ser procesada en la máquina 1 y un 0 en la misma posición se corresponderá con el caso contrario

En el anexo se muestra la matriz de incidencia comentada, aunque en la ilustración que aparece a continuación se puede observar una pequeña muestra.

	Shoot peening					
	HP	Spar (PR01)	Carousel (PR02)	630 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)
S/0322	1				1	
S/0323	1				1	
S/0324	1				1	
S/0325	1				1	
S/0326	1				1	
S/0328	1					
S/0329					1	
S/0332	1				1	
S/0333	1				1	
S/0336	1				1	
S/0338	1				1	
S/0344	1				1	
S/0348	1				1	
S/0349	1				1	
S/0350	1				1	

Ilustración 12.- Muestra matriz de incidencia

En este caso se han utilizados varios métodos y modelos ya estudiados para la formación de células.

Por un lado, se han resuelto los métodos iterativos con la herramienta Excel, dando todos resultados similares en cuanto a la formación de las células. Posteriormente, se ha utilizado un modelo de optimización con la herramienta Lingo, en el que asigna, a cada una de las células ya concretada mediante los modelos anteriores, una localización en planta. Este modelo calculará las distancias entre células, información que será determinante para los resultados de la simulación.

5.1.1 Métodos basados en la reordenación de la matriz de incidencia

Son métodos iterativos, mediante la manipulación de la matriz de incidencia, moviendo sus filas y columnas, se construyen submatrices en las que se agrupan los 1s, estas submatrices se convertirán en las células.

Son métodos no muy complejos, que suelen dar una solución bastante aproximada.

5.1.1.1 ROC (Rank Order Clustering)

Este método, ya explicado en el apartado 3, se ha llevado a la práctica utilizando la herramienta Excel. Se han necesitado 3 iteraciones para llegar a la solución final. Para ello, se han multiplicado los 1s de la matriz por sus respectivos coeficientes múltiplos de 2, obteniendo así un número asociado a cada fila (o columna, depende de la iteración) y posteriormente ordenarlos según este número en orden decreciente.

Esta última fase nos dará una matriz en la que los 1s están agrupados y así será visualmente fácil encontrar las células propuestas por el sistema. En el anexo se encuentra la resolución del problema mediante este método, aunque a continuación se puede ver una pequeña muestra de la matriz final.

	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)	Manual (PR09)	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)	Manual (PR09)
S/0322	1				1			S/1179	1				1	
S/0323	1				1			S/1245	1				1	
S/0324	1				1			S/1248	1				1	
S/0325	1				1			S/1250	1				1	
S/0326	1				1			S/1252	1				1	
S/0332	1				1			S/1253	1				1	
S/0333	1				1			S/1261	1				1	
S/0336	1				1			S/1267	1				1	
S/0338	1				1			S/1272	1				1	
S/0344	1				1			S/1274	1				1	
S/0348	1				1			S/1275	1				1	

Ilustración 13.- Muestra matriz solución método ROC

Como solución final obtenemos una agrupación bastante clara en cuanto a la primera célula a formar, esta sería la compuesta por la máquina Spar y Manual 06, que es justamente el ejemplo que se observa en la muestra de la matriz solución. Observando la matriz, la decisión a tomar con respecto a las siguientes células no es tan clara. A simple vista se puede ver que es mucho mayor el número de huecos que de incidencias, por lo que se ha decidido dar como solución de este método la formación de las células restantes como independientes, es decir, cada una de ellas se corresponde con una sola célula.

Por lo tanto, la solución final de este método estaría compuesta por 5 células: La célula 1 estaría formada por las máquinas Spar y Manual 06, y las células 2, 3, 4, 5 por las maquinas Carrusel, 613, ID y Manual 09 respectivamente.

5.1.1.2 DCA (Direct Clustering Algorithm)

Posteriormente se ha empleado el método DCA, al igual que en el caso anterior la solución completa se encuentra en el anexo y, también como en el caso del ROC y como se ha explicado en el apartado 3, este método crea diferentes índices, según los cuales se reordenará la matriz para encontrar la mejor solución.

En este caso se han necesitado 2 iteraciones hasta encontrar una matriz estable, en la que cualquier cambio iguala o empeora la solución final. Al igual que en el caso anterior, la solución completa se puede encontrar en el anexo de este documento.

	HP	Spar (PR01)	Manual (PR06)	613 (PR03)	ID (PR04)	Carrusel (PR02)	Manual (PR09)	HP	Spar (PR01)	Manual (PR06)	613 (PR03)	ID (PR04)	Carrusel (PR02)	Manual (PR09)
S/0410	1	1					1	S/1116	1	1				
S/0322	1	1						S/1149	1	1				
S/0323	1	1						S/1150	1	1				
S/0324	1	1						S/1159	1	1				
S/0325	1	1						S/1160	1	1				
S/0326	1	1						S/1179	1	1				
S/0332	1	1						S/1245	1	1				
S/0333	1	1						S/1248	1	1				
S/0336	1	1						S/1250	1	1				
S/0338	1	1						S/1252	1	1				
S/0344	1	1						S/1253	1	1				

Ilustración 14.- Muestra matriz solución método DCA

En este caso, como en el anterior se observa claramente la formación de la célula Spar y Manual 06, mientras que, en los demás casos, se observa una matriz desordenada, en la que, para cualquier combinación de máquinas, los huecos son mayores que las incidencias. Por lo tanto, la solución final sería la misma que en el caso anterior, con la única agrupación de células de las máquinas Spar y Manual 06.

5.1.2 Métodos de agrupamiento jerárquico basados en coeficientes de similitud

Como se ha explicado en el apartado 3, son métodos que agrupan objetos similares en conjuntos; si se agrupan máquinas hablamos de células y si se agrupan piezas hablamos de familias. La agrupación se realiza mediante una matriz de incidencia, con la que se calculan coeficientes que miden la similitud entre objetos.

A continuación, se lleva a la práctica el método, utilizando los datos del caso de estudio.

5.1.2.1 SLCA (Single Linkage Clustering Algorithm)

Como se ha visto a continuación, la primera fase de este método, sería aplicar una sencilla fórmula que pondera las incidencias y huecos entre máquinas, obteniendo así un coeficiente de similitud entre de las posibles formaciones de células.

Como resultado de aplicar esta fórmula a todas las combinaciones de máquinas, se obtiene la matriz representada a continuación; un valor alto significa que tienen una gran similitud y uno pequeño representaría que tienen pocas piezas que en su ruta tengan las dos máquinas. De esta misma forma, en los casos extremos, un 1 en el coeficiente de similitud significaría coincidencia total, es decir todas y cada una de las piezas que pasan por la máquina n, también pasan por la máquina m y un 0 en el coeficiente de similitud representa que no hay ninguna pieza que pase por ambas máquinas en su recorrido.

A continuación, se muestra la matriz de similitud resultante anteriormente mostrada. Aunque se ha creado para aplicar el método SLCA, esta primera matriz será la misma para todos los métodos, con la diferencia de que los coeficientes posteriores, o las decisiones a tomar pueden no coincidir.

Tabla 1.- Coeficientes de similitud para la formación de células

Matriz slca						
	Spar	Carrusel	630	ID	Manual06	Manual09
Spar		0	0,00591716	0	0,8041958	0,007692308
Carrusel			0	0	0	0
630				0,043478261	0	0
ID					0	0
Manual06						0,015267176
Manual09						

Esta primera fase de coeficientes de similitud deja muy claro que las máquinas que deben formar una célula son Spar y Manual 06, ya que el coeficiente es del 80%, por lo tanto, en el segundo nivel del dendograma esta será si porcentaje de similitud. Así mismo, el porcentaje de similitud de cada uno de los niveles, se corresponderá con el coeficiente de similitud elegido, multiplicado por 100.

Al tomar esta decisión se vuelven a calcular los coeficientes, utilizando para las células ya combinadas el valor máximo de entre las dos máquinas. Se vuelve a tomar una decisión y así se van avanzando niveles hasta formar el dendograma mostrado a continuación. Todas las iteraciones necesarias para crear el dendograma se encuentran en el anexo.

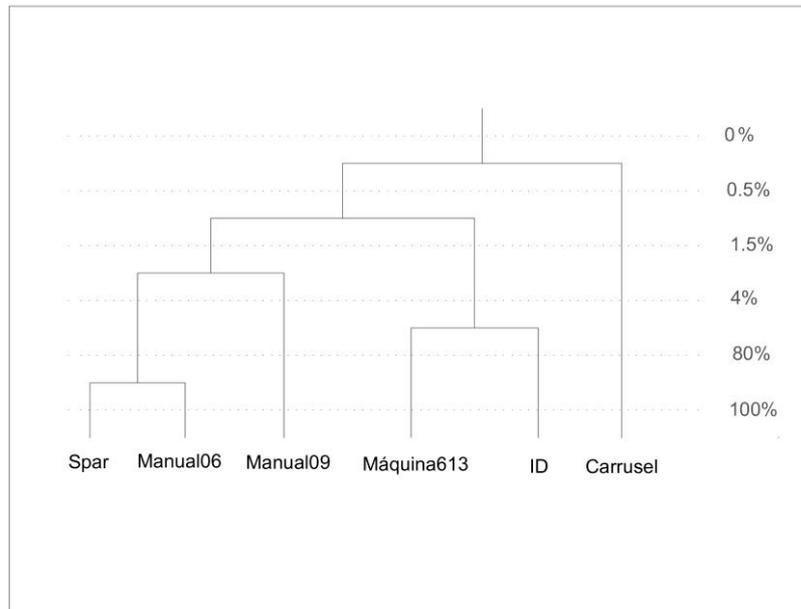


Ilustración 15.- Solución SLCA

Después de resolver este método será necesario una asignación de piezas a familias. En este caso no se ha realizado la asignación, pero bastará con que las piezas que necesiten procesado en cualquiera de las máquinas de la célula correspondiente se asignen a la familia asociada a esa célula. Se procede de la misma forma para los dos casos posteriores.

5.1.2.2 CLCA (Complete Linkage Clustering Algorithm)

Sigue el mismo proceso que el SLCA, con la única diferencia de que, al recalcular los valores, en vez de tomar el valor máximo de entre las máquinas que componen la célula y la otra máquina con la que se está calculando el coeficiente, se coge el valor mínimo.

En este caso, este procedimiento no afecta a la formación de células, ya que se siguen tomando las mismas decisiones, sin embargo, los porcentajes de similitud son diferentes.

En el anexo se puede encontrar la resolución del modelo, mostrando las diferentes iteraciones y a continuación se ilustra el dendrograma solución del método, con sus respectivos niveles y porcentajes.

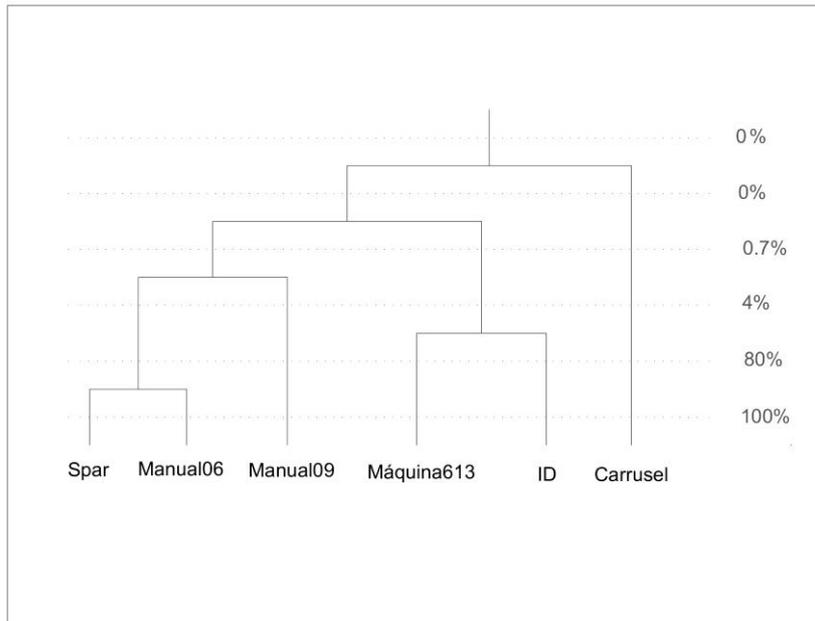


Ilustración 16.- Solución CLCA

En este caso, para la última agrupación sería indiferente cuál de las opciones elegir, debido a que, cualquiera de las decisiones recibe un 0% de porcentaje de similitud.

5.1.2.3 ALCA (Average Linkage Clustering Algorithm)

Este caso es muy parecido a los dos anteriores, con la diferencia de que, en vez de coger el máximo o el mínimo, se utiliza la media de las dos máquinas. Se observa que, aunque la formación de células no varía, los porcentajes son ligeramente diferentes.

De la misma manera que en los dos casos anteriores, se puede encontrar la resolución completa del método en el anexo.

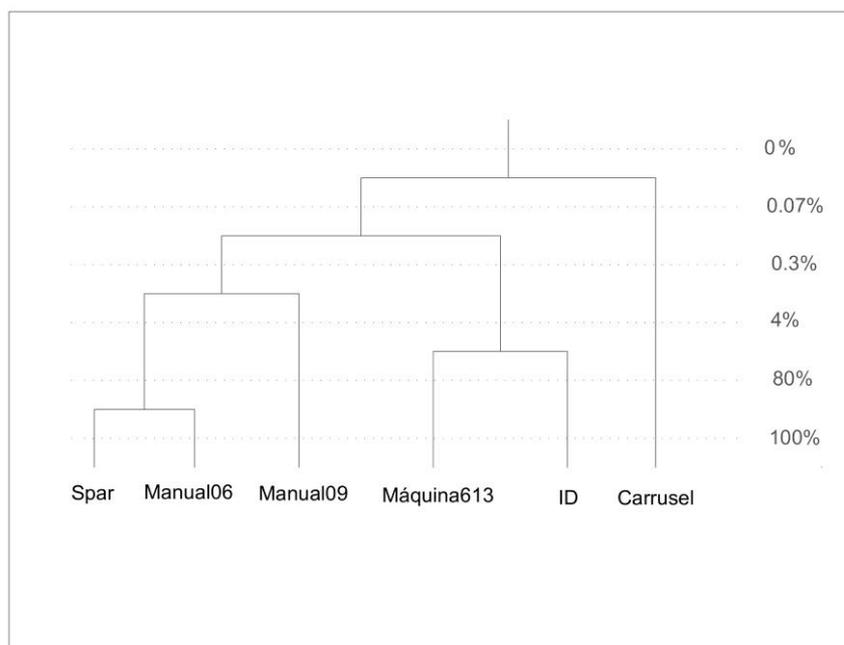


Ilustración 17.- Solución ALCA

5.1.3 Métodos basados en modelos matemáticos de optimización.

Este tipo de métodos tienen como desventaja que se da una solución única, en la que no se observa el proceso interno de la simulación, a diferencia de los métodos anteriores en los que se puede ver el comportamiento de los datos en cada iteración. Como se ha comprobado en los métodos anteriores, en este caso están bastante claras las células a formar ya que todos los métodos dan resultados muy parecidos. Aún así, se ha querido resolver los modelos de optimización para ver su funcionamiento y comprobar que la toma de decisiones es parecida.

Ambos modelos, ya explicados en el apartado 3 precisan dos partes, una, en la que se forman las células agrupando las máquinas correspondientes y otra en la que se asignan las máquinas que corresponderán a cada familia. Para ello se emplearán dos modelos de optimización parecidos.

Para resolver estos modelos se ha empleado la herramienta de resolución de modelos de optimización lineales y no lineales Lingo. Esta herramienta está brevemente introducida en el anexo, explicando su enfoque y las instrucciones básicas que forman el lenguaje de programación.

5.1.3.1 P-MEDIANA

Este método se basa en uno de los problemas básicos de optimización, en este problema se tienen diferentes datos, localizados en el plano (en el caso de dos variables), se busca colocar puntos en el plano, minimizando la distancia entre los puntos a localizar y los datos. Hay diferentes variantes de este problema, por ejemplo, poniendo como restricción el número de puntos a localizar o poniendo como restricción una distancia que ninguno de los puntos puede superar.

Los datos a introducir para la resolución del modelo serán; la matriz de incidencia entre máquinas y piezas ya mostrada y el número de familias que se quieren formar. En este caso, ya conociendo el comportamiento de los datos del caso, se han decidido formar 5 familias.

A continuación, se muestra la programación del modelo en la herramienta Lingo. Su modelado se encuentra en el apartado 3.

- **Formación de células**

Model:

SETS:

```
!Conjunto de maquinas;
maquina/1..6/;;
!Conjunto de piezas;
pieza/1..205/;;
!Conjunto de piezas;
compara (maquina, maquina): x, S, a, b, c;
!Matriz de incidencia;
incidencia (maquina, pieza): matriz;
endsets
```

data:

```
!Numero de familias;
F= 5;
!Matriz de incidencia;
matriz=
;
enddata
```

!RESTRICCIONES;

!Calculo de los coeficientes de similitud;

```
@for (maquina (p) :
  @for (maquina (q) | q#NE#p:
    a (p, q)=@sum (pieza (i) : @if ((matriz (p, i) #EQ# 1) #AND# (matriz (q, i) #EQ# 1), 1, 0));
    b (p, q)=@sum (pieza (i) : @if ((matriz (p, i) #EQ# 1) #AND# (matriz (q, i) #EQ# 0), 1, 0));
    c (p, q)=@sum (pieza (i) : @if ((matriz (p, i) #EQ# 0) #AND# (matriz (q, i) #EQ# 1), 1, 0));
    S (p, q)=a (p, q) / (a (p, q) +b (p, q) +c (p, q)););
@for (maquina (p) :
  a (p, p)=0;
  b (p, p)=0;
```

```

c(p,p)=0;
S(p,p)=0;);
!Cada pieza se asigna a una familia;
@for(maquina(p):
    @sum(maquina(q): x(p,q)=1; );
!Se tienen que formar F familias;
@sum(maquina(q): x(q,q)=F;
!Si una pieza no es mediana, no se le asignan piezas;
@for(maquina(p):
    @for(maquina(q):
        x(p,q)<=x(q,q);););
U=@sum(maquina(p):
    @sum(maquina(q): S(p,q)*x(p,q); ););
!FUNCIÓN OBJETIVO;
Max= U;
!Definición de binarias;
@for(compara:@bin(x));

END

```

Al resolver el modelo con los datos del caso se ha conseguido la siguiente solución:

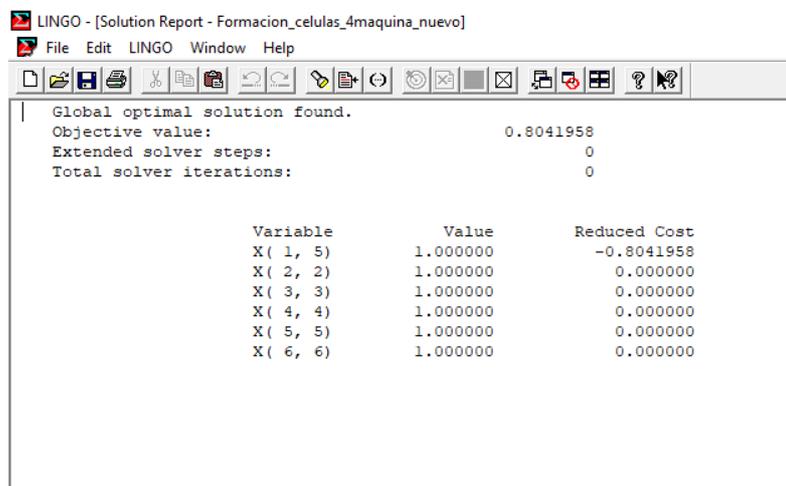


Ilustración 18.- Formación de células según método p-mediana

Como se observa en la imagen, las 5 células formadas serían:

Tabla 2.- Solución de formación de células según el método p-mediana

Células	Máquinas
Célula 1	Spar y Manual 06
Célula 2	Carrusel
Célula 3	613
Célula 4	ID
Célula 5	Manual 09

- **Asignación de piezas a cada célula:** Como se ha comentado al inicio de la explicación del método, después de formar las células, se requiere una segunda parte en la que se asignan las

piezas a cada célula, formando así las familias. Se ha resuelto el modelo introduciendo los datos de la matriz de incidencia y de la formación de células propuesta por el anterior modelo.

```

Model:
SETS:
!Maquina-célula;
asignacion_maquina(pieza,celulas):delta;
!Matriz de asignacion pieza-célula;
asignacion(maquina,celulas):m;
!Matriz de incidencia;
incidencia(maquina,pieza):matriz;
endsets

data:
!Numero de familias;
F= 5;
!Matriz de incidencia;
matriz=
;
!Matriz de de asignacion pieza-célula;
m=
1 0 0 0 0
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
1 0 0 0 0
0 0 0 0 1
;

enddata
!RESTRICCIONES;
!Cada máquina se le asigna a una célula;
@for(pieza(i):
    @sum(celulas(k): delta(i,k)=1);
!Cada célula es asignada al menos una maquina;
@for(celulas(k):
    @sum(pieza(i): delta(i,k))>=1);
huecos=@sum(pieza(p):
    @sum(celulas(k):
        @sum(maquina(i):(1-matriz(i,p))*delta(p,k))*m(i,k)); );

excepcionales=@sum(pieza(p):
    @sum(celulas(k):
        @sum(maquina(i):(matriz(i,p)*(1-delta(p,k))))*m(i,k)); ););

!FUNCIÓN OBJETIVO;
Min= huecos+excepcionales;
!Definición de binarias;
@for(asignacion_maquina:@bin(delta));

END

```

Como resultado se obtiene una matriz binaria, un 1 en la matriz, en la posición (2,3) representaría que la pieza 2, sería asignada a la célula 3 y un 0 el caso contrario.

A continuación, se muestra la solución:

5.1.3.2 Modelo de asignación

Este método busca maximizar la similitud entre máquinas, tiene poco en cuenta los huecos, por lo tanto, la solución será diferente. En este caso el mismo modelo decide cuántas células formar, por lo que no será necesario introducir este dato.

- **Formación de máquinas:** Primero se ha utilizado este modelo para saber qué máquinas corresponderán a cada célula.

Model:

```
SETS:
!Conjunto de maquinas;
maquina/1..6/;;
!Conjunto de piezas;
pieza/1..205/;;
!Conjunto de piezas;
compara(maquina,maquina): X,S;
!Matriz de incidencia;
incidencia(maquina,pieza):matriz;
endsets

data:
!Matriz de incidencia;
matriz=
;
enddata

!RESTRICCIONES;
!Calculo de los coeficientes de similitud;
@for(maquina(m):
    @for(maquina(n)|n#NE#m:
        S(m,n)=@sum(pieza(p):
            @if(matriz(m,p)#EQ#matriz(n,p),1,0);)););

@for(maquina(m):
    S(m,m)=0;);
!Cada maquina se empareja consigo o con otra maquina en la misma celula;

@for(maquina(m):
    @sum(maquina(n): X(m,n))=1; );
@for(maquina(n):
    @sum(maquina(m): X(m,n))=1; );
U=@sum(maquina(m):
    @sum(maquina(n): S(m,n)*X(m,n); ); );

!FUNCIÓN OBJETIVO;
Max= U;
!Definición de binarias;
@for(compara:@bin(X));

END
```

Como solución, obtenemos los siguientes datos:

Variable	Value	Reduced Cost
X(1, 5)	1.000000	-177.0000
X(2, 6)	1.000000	-186.0000
X(3, 4)	1.000000	-161.0000
X(4, 3)	1.000000	-161.0000
X(5, 1)	1.000000	-177.0000
X(6, 2)	1.000000	-186.0000

Ilustración 19.- Solución formación de células según método asignación

Con este modelo de asignación se formarían 3 células, que son las siguientes:

Tabla 3.- Solución de formación de células según el método de asignación

Células	Máquinas
Célula 1	Spar y Manual 06
Célula 2	Carrusel y Manual 09
Célula 3	613 e ID

Aunque este método muestra que la solución óptima serían estas 3 células, al haber empleado los modelos anteriores, se conoce que la similitud entre máquinas se reduce considerablemente, por lo que la inversión que supone el cambio de layout y la agrupación de máquinas en células, difícilmente será rentabilizada con las mejoras del sistema.

- **Asignación de piezas a las células correspondientes:** Se aplica el segundo modelo de optimización, que relacionará las diferentes piezas entre sí, para asignarlas posteriormente a una de las células.

Model:

SETS:

```
!Conjunto de maquinas;
maquina/1..6/;;
!Conjunto de piezas;
pieza/1..205/;;
!Conjunto de piezas;
compara(pieza,pieza): Y,S;
!Matriz de incidencia;
incidencia(maquina,pieza):matriz;
endsets
```

data:

```
!Matriz de incidencia;
matriz=
;
enddata
```

```
!RESTRICCIONES;
!Calculo de los coeficientes de similitud;
```

```

@for (pieza (p) :
    @for (pieza (q) | q#NE#p:
        S (p,q)=@sum (maquina (i) :
            @if (matriz (i,p)#EQ# matriz (i,q),1,0); ); );
@for (pieza (p) :
    S (p,p)=0; );
!Cada pieza se empareja consigo o con otra pieza en la misma familia;
@for (pieza (p) :
    @sum (pieza (q) : Y (p,q) =1; );
@for (pieza (q) :
    @sum (pieza (p) : Y (p,q) =1; );

U=@sum (pieza (p) :
    @sum (pieza (q) : S (p,q) *Y (p,q) ; ); );
!FUNCIÓN OBJETIVO;
Max= U;
!Definición de binarias;
@for (compara:@bin (Y) );

END

```

Al resolver el modelo se encuentra como solución, una matriz que relaciona las piezas entre sí. En este caso se han mostrado solo las piezas relacionadas (a las que les corresponde un 1), pero esta matriz tiene de dimensiones 205 columnas, por 205 filas. A cada una de las combinaciones de piezas se le asigna un valor binario, correspondiendo el 1 a la decisión de que pertenezcan a la misma familia, y un 0 correspondiendo a la decisión de que pertenecen a familias diferentes.

Posteriormente, observando las rutas de las familias, es sencillo asociar cada familia a su célula correspondiente.

Variable	Value
Y(1, 2)	1.000000
Y(2, 143)	1.000000
Y(3, 134)	1.000000
Y(4, 91)	1.000000
Y(5, 1)	1.000000
Y(6, 19)	1.000000
Y(7, 144)	1.000000
Y(8, 197)	1.000000
Y(9, 90)	1.000000
Y(10, 169)	1.000000
Y(11, 42)	1.000000
Y(12, 108)	1.000000
Y(13, 100)	1.000000
Y(14, 170)	1.000000
Y(15, 23)	1.000000
Y(16, 51)	1.000000
Y(17, 64)	1.000000
Y(18, 69)	1.000000
Y(19, 40)	1.000000
Y(20, 203)	1.000000
Y(21, 161)	1.000000
Y(22, 131)	1.000000
Y(23, 178)	1.000000
Y(24, 3)	1.000000
Y(25, 122)	1.000000
Y(26, 27)	1.000000
Y(27, 66)	1.000000
Y(28, 18)	1.000000
Y(29, 11)	1.000000

Y(30, 22)	1.000000
Y(30, 115)	1.000000
Y(31, 205)	1.000000
Y(32, 189)	1.000000
Y(33, 4)	1.000000
Y(34, 36)	1.000000
Y(35, 159)	1.000000
Y(36, 39)	1.000000
Y(37, 194)	1.000000
Y(38, 81)	1.000000
Y(39, 156)	1.000000
Y(40, 196)	1.000000
Y(41, 49)	1.000000
Y(42, 117)	1.000000
Y(43, 201)	1.000000
Y(44, 9)	1.000000
Y(45, 88)	1.000000
Y(46, 152)	1.000000
Y(47, 199)	1.000000
Y(48, 145)	1.000000
Y(49, 34)	1.000000
Y(50, 16)	1.000000
Y(51, 121)	1.000000
Y(52, 38)	1.000000
Y(53, 59)	1.000000
Y(54, 80)	1.000000
Y(55, 177)	1.000000
Y(56, 158)	1.000000
Y(57, 98)	1.000000
Y(58, 146)	1.000000
Y(59, 55)	1.000000
Y(60, 127)	1.000000
Y(61, 78)	1.000000
Y(62, 32)	1.000000
Y(63, 82)	1.000000
Y(64, 140)	1.000000
Y(65, 170)	1.000000

on_Piezas.mic	
Y(65, 119)	1.000000
Y(66, 113)	1.000000
Y(67, 187)	1.000000
Y(68, 162)	1.000000
Y(69, 112)	1.000000
Y(70, 198)	1.000000
Y(71, 129)	1.000000
Y(72, 153)	1.000000
Y(73, 74)	1.000000
Y(74, 73)	1.000000
Y(75, 192)	1.000000
Y(76, 70)	1.000000
Y(77, 61)	1.000000
Y(78, 139)	1.000000
Y(79, 50)	1.000000
Y(80, 54)	1.000000
Y(81, 79)	1.000000
Y(82, 72)	1.000000
Y(83, 77)	1.000000
Y(84, 83)	1.000000
Y(85, 175)	1.000000
Y(86, 102)	1.000000
Y(87, 147)	1.000000
Y(88, 104)	1.000000
Y(89, 48)	1.000000
Y(90, 132)	1.000000
Y(91, 93)	1.000000
Y(92, 58)	1.000000
Y(93, 150)	1.000000
Y(94, 8)	1.000000
Y(95, 160)	1.000000
Y(96, 25)	1.000000
Y(97, 105)	1.000000
Y(98, 137)	1.000000
Y(99, 57)	1.000000
Y(100, 51)	1.000000

Asignacion_Piezas.mic	
Y(100, 5)	1.000000
Y(101, 87)	1.000000
Y(102, 86)	1.000000
Y(103, 133)	1.000000
Y(104, 106)	1.000000
Y(105, 190)	1.000000
Y(106, 22)	1.000000
Y(107, 174)	1.000000
Y(108, 148)	1.000000
Y(109, 44)	1.000000
Y(110, 186)	1.000000
Y(111, 29)	1.000000
Y(112, 149)	1.000000
Y(113, 89)	1.000000
Y(114, 204)	1.000000
Y(115, 107)	1.000000
Y(116, 24)	1.000000
Y(117, 35)	1.000000
Y(118, 130)	1.000000
Y(119, 68)	1.000000
Y(120, 141)	1.000000
Y(121, 200)	1.000000
Y(122, 96)	1.000000
Y(123, 111)	1.000000
Y(124, 128)	1.000000
Y(125, 110)	1.000000
Y(126, 52)	1.000000
Y(127, 47)	1.000000
Y(128, 84)	1.000000
Y(129, 181)	1.000000
Y(130, 15)	1.000000
Y(131, 193)	1.000000
Y(132, 43)	1.000000
Y(133, 155)	1.000000
Y(134, 31)	1.000000
Y(135, 28)	1.000000

on_Piezas.mic	
Y(136, 99)	1.000000
Y(137, 125)	1.000000
Y(138, 195)	1.000000
Y(139, 124)	1.000000
Y(140, 151)	1.000000
Y(141, 120)	1.000000
Y(142, 118)	1.000000
Y(143, 135)	1.000000
Y(144, 164)	1.000000
Y(145, 116)	1.000000
Y(146, 62)	1.000000
Y(147, 109)	1.000000
Y(148, 45)	1.000000
Y(149, 26)	1.000000
Y(150, 33)	1.000000
Y(151, 188)	1.000000
Y(152, 136)	1.000000
Y(153, 176)	1.000000
Y(154, 95)	1.000000
Y(155, 166)	1.000000
Y(156, 41)	1.000000
Y(157, 165)	1.000000
Y(158, 154)	1.000000
Y(159, 114)	1.000000
Y(160, 46)	1.000000
Y(161, 20)	1.000000
Y(162, 163)	1.000000
Y(163, 65)	1.000000
Y(164, 172)	1.000000
Y(165, 6)	1.000000
Y(166, 101)	1.000000
Y(167, 67)	1.000000
Y(168, 180)	1.000000
Y(169, 92)	1.000000
Y(170, 167)	1.000000
Y(171, 71)	1.000000

n_Piezas.mic	
Y(171, 71)	1.000000
Y(172, 17)	1.000000
Y(173, 56)	1.000000
Y(174, 173)	1.000000
Y(175, 76)	1.000000
Y(176, 138)	1.000000
Y(177, 63)	1.000000
Y(178, 142)	1.000000
Y(179, 182)	1.000000
Y(180, 191)	1.000000
Y(181, 171)	1.000000
Y(182, 202)	1.000000
Y(183, 75)	1.000000
Y(184, 183)	1.000000
Y(185, 14)	1.000000
Y(186, 21)	1.000000
Y(187, 94)	1.000000
Y(188, 7)	1.000000
Y(189, 185)	1.000000
Y(190, 103)	1.000000
Y(191, 179)	1.000000
Y(192, 184)	1.000000
Y(193, 30)	1.000000
Y(194, 37)	1.000000
Y(195, 53)	1.000000
Y(196, 157)	1.000000
Y(197, 10)	1.000000
Y(198, 60)	1.000000
Y(199, 126)	1.000000
Y(200, 85)	1.000000
Y(201, 123)	1.000000
Y(202, 168)	1.000000
Y(203, 97)	1.000000
Y(204, 13)	1.000000
Y(205, 12)	1.000000

5.1.4 Toma decisión células a formar.

En este caso, como se ha ido observando en los métodos utilizados que la primera formación de la célula 1, agrupando la máquina Spar y Manual 06 es clara. En todos los métodos empleados, sin excepción se considera la célula con mayor similitud. Para los siguientes casos no se ve tan clara la formación, ya que, aunque se reduce mucho el porcentaje de similitud de las siguientes células (de un 80% a un 4%) se podría considerar la opción.

En este caso se ha decidido formar las 5 células, agrupando solo las dos máquinas, debido a que las similitudes de ellas, son bastante menores a las diferencias.

Células	Máquinas
Célula 1	Spar y Manual 06
Célula 2	Carrusel
Célula 3	613
Célula 4	ID
Célula 5	Manual 09

Ilustración 20.- Decisión final de formación de células

Para la identificación de familias basta con observar la matriz de incidencia de cada una, para ello se ha utilizado una secuencia, esta secuencia recoge todas las posibles rutas que recorre una máquina, en este caso 11 secuencias diferentes. Cada una de las secuencias se asocia a una o varias células.

Las diferentes secuencias y asociaciones a células se recogen en la siguiente tabla.

Secuencia	Máquinas	Células
1	Spar y Manual 06	1
2	Spar	1
3	Carrusel	2
4	613	3
5	ID	4
6	Manual 06	1
7	Spar, Manual 06 y Carrusel	1+2
8	Spar y 613	1+3
9	Spar, Manual 06 y Manual 09	1+5
10	613 e ID	3+4
11	Manual 06 y Manual 09	1+5

Ilustración 21.-Familias y asociación a células

De esta forma queda resuelta la primera parte del estudio, la formación de células y familias y su relación. En los siguientes apartados se realizará un estudio de las localizaciones en planta de las células ya identificadas y posteriormente la simulación en el programa Arena de los diferentes escenarios, de los que se obtendrá una comparación de los resultados con el cambio propuesto por el método utilizado.

6 ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES

Una vez calculadas las células que se van a utilizar, el siguiente paso será ver dónde se colocan en la planta. Para ello se ha creado un modelo de optimización que calcula el mínimo del sumatorio de distancias que van a recorrer las piezas. Asociando así las células correspondientes, a las localizaciones previamente indicadas.

Con este dato podremos saber cuál es la distancia entre células, datos que posteriormente serán necesarios para la simulación.

6.1 Datos

Se tienen las siguientes informaciones:

- Layout de la planta y localizaciones disponibles
- Distancia entre las localizaciones
- Cantidad de piezas en los datos utilizados como referencia que se recorren las distancias

6.1.1 Layout de la planta y localizaciones disponibles

Se consideran las siguientes localizaciones, dejando la parte este de la planta para posibles ampliaciones o una nueva máquina que se pueda adquirir en el futuro. Se ha dejado de utilizar esta localización porque es la que se encuentra más lejos de la entrada y por lo tanto las distancias y en consecuencia los transportes serán mayores.

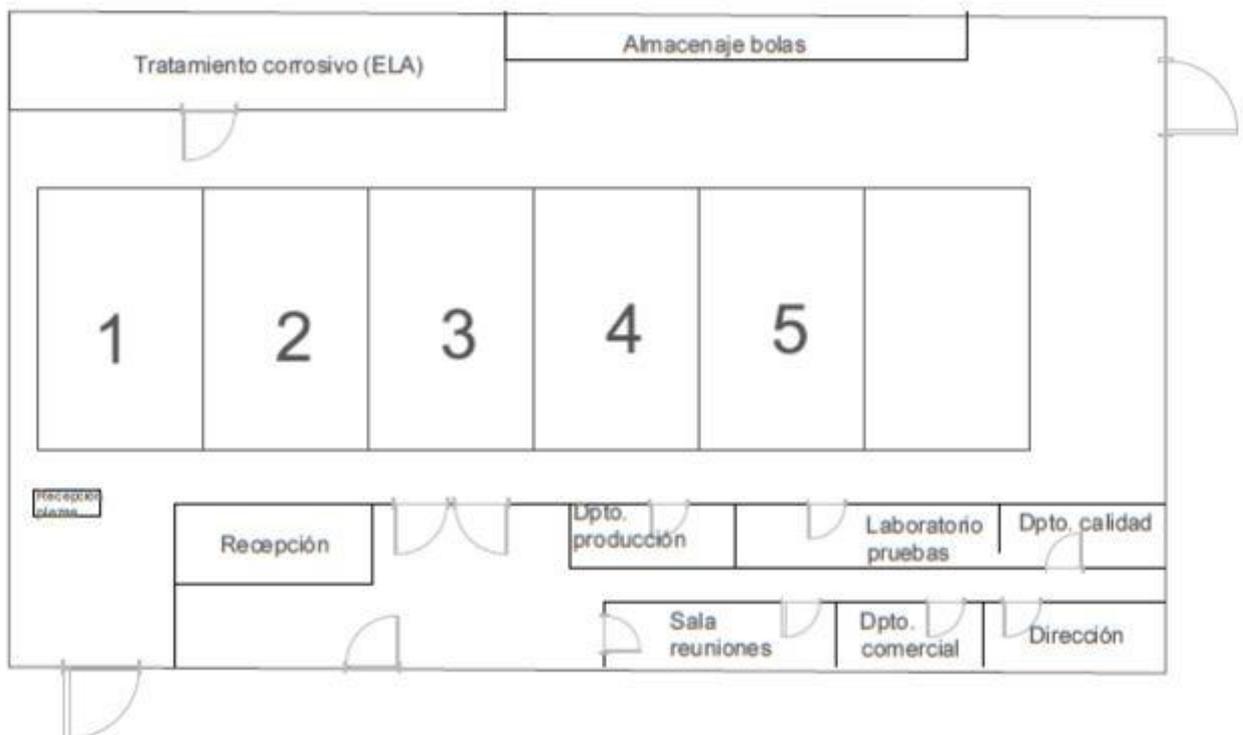


Ilustración 22.- Posibles localizaciones layout

6.1.2 Distancia entre localizaciones.

Se consideran las siguientes distancias (en metros) entre localizaciones. Representadas en la siguiente matriz:

Tabla 4.- Distancia entre células

LOCALIZACIONES	1	2	3	4	5
entrada	5	10	15	20	25
1	0	2,5	5	7,5	10
2		0	2,5	5	7,5
3			0	2,5	5
4				0	2,5
5					0

Sin embargo, para el modelo de optimización se necesitan los datos de la distancia que recorre una pieza con cada combinación de localizaciones, para ello se deben considerar tanto las distancias de entrada y salida como las distancias intercelulares.

Por ejemplo, para saber lo que recorrería una pieza que solo necesita ser procesada en la célula de trabajo correspondiente a la localización 1, se sumaría dos veces la distancia entre la entrada y la localización 1. En el caso de dos células, para saber lo que recorrería una pieza que necesita ser procesada en las células correspondientes a las localizaciones 1 y 2, se suma la distancia de la entrada hasta 1, la distancia entre la localización 1 y la localización 2 y la distancia de 2 hasta la entrada.

De esta forma se consigue la siguiente matriz representada, que será la denominada en el modelo como distancia.

Tabla 5.- Cálculo de distancia total de traslados entre células

DISTANCIAS					
LOCALIZACIONES	1	2	3	4	5
1	10	17,5	25	32,5	40
2		20	27,5	35	42,5
3			30	37,5	45
4				40	47,5
5					50

6.1.3 Ponderación de rutas

Esta información es necesaria para saber qué recorridos son los más frecuentes. Para ello se han utilizado los datos de un trimestre y se ha comprobado el número de veces que hace cada recorrido.

Los datos se han obtenido de las secuencias utilizadas para la simulación en Arena. Cada secuencia se corresponde con una combinación máquinas y cada combinación de máquinas con una combinación de células.

Se han representado en la siguiente matriz las cantidades de referencias (piezas), que pasan por cada célula.

Tabla 6.- Resumen piezas que recorren cada máquina según secuencia

Cantidad de piezas por secuencia			
Secuencia	Máquinas	Células	Cantidad
1	Spar y Manual 06	1	600
2	Spar	1	23
3	Carrusel	2	53
4	613	3	140
5	ID	4	8
6	Manual 06	1	164
7	Spar, Manual 06 y Carrusel	1+2	5
8	Spar y 613	1+3	27
9	Spar, Manual 06 y Manual 09	1+5	11
10	613 e ID	3+4	6
11	Manual 06 y Manual 09	1+5	7

Sumando las cantidades para las siguientes células se consigue la matriz necesaria para introducir en el modelo, esta matriz representa, para cada combinación de células, la cantidad de veces que se utiliza la ruta en la muestra representativa tomada.

Tabla 7.- Cálculo de transportes por combinación de células

CANTIDAD RELACIONES					
CÉLULAS	1	2	3	4	5
1	787	5	27	0	11
2		53	0	0	0
3			140	6	0
4				8	0
5					1

6.2 Modelo

- **Subíndices:**

K: máquinas

I: posición

- **Variables:**

x_{ki} : variable binaria que toma el valor 1 si la máquina k se coloca en la posición i y el valor 0 en el caso contrario.

$\alpha_{kk'ii'}$: variable binaria dependiente de x_{ki} que toma el valor 1 en el caso de que k se coloque en la posición i y también k' se coloque en la posición i' .

- **Función objetivo:**

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{k=6} \sum_{k'=1}^{k'=6} \sum_{i=1}^{i=6} \sum_{i'=1}^{i'=6} \text{rutas}_{kk'} * \text{distancia}_{ii'} * \alpha_{kk'ii'}$$

- **Restricciones:**

(1) Todas las máquinas deben llevar asociadas, exactamente una posición.

$$\sum_{i=1}^{i=6} x_{ki} = 1 \quad k = 1 \dots 5$$

(2) Todas las posiciones deben llevar asociadas, exactamente una máquina.

$$\sum_{k=1}^{k=6} x_{ki} = 1 \quad i = 1 \dots 5$$

(3) Asociar las variables x_{ki} y $x_{k'i'}$ a una única variable $\alpha_{kik'i'}$.

$$x_{ki} + x_{k'i'} \leq 1 + \alpha_{kik'i'} \quad k, k', i, i' = 1 \dots 5$$

Model:

!Definición de índices y variables;

```
SETS:
maquina/1..6/;;
posicion/1..6/;;
pos_maquina(maquina, posicion, maquina, posicion):alpha;
asignacion(maquina, posicion):x;
maq_maq(maquina, maquina):rutas;
pos_pos(posicion, posicion):distancia;
ENDSETS
```

!Datos a introducir;

```
Data:
rutas=
;
distancia=
;
Enddata
```

!Restricción (1);

```
@for(maquina(k):
    @sum(posicion(i):x(k,i))=1;    );
```

!Restricción (2);

```
@for(posicion(i):
    @sum(maquina(k):x(k,i))=1;    );
```

!Restricción (3);

```
@for(maquina(k):
    @for(posicion(i):
        @for(maquina(l):
            @for(posicion(j): x(k,i)+x(l,j)<=1+alpha(k,i,l,j)); ); ); );
```

!Función objetivo;

```
Min = @sum(maquina(k):
    @sum(maquina(l):
        @sum(posicion(i):
            @sum(posicion(j):
                rutas(k,l)*distancia(j,i)*alpha(k,i,l,j)); ); ); );
```

!Definición de variables binarias;

```
@for(pos_maquina:@bin(alpha));
```

```
@for (asignacion:@bin(x) );
END
```



Ilustración 23.-Modelado para la localización de células

6.3 Resultados

Los resultados obtenidos son los siguientes:

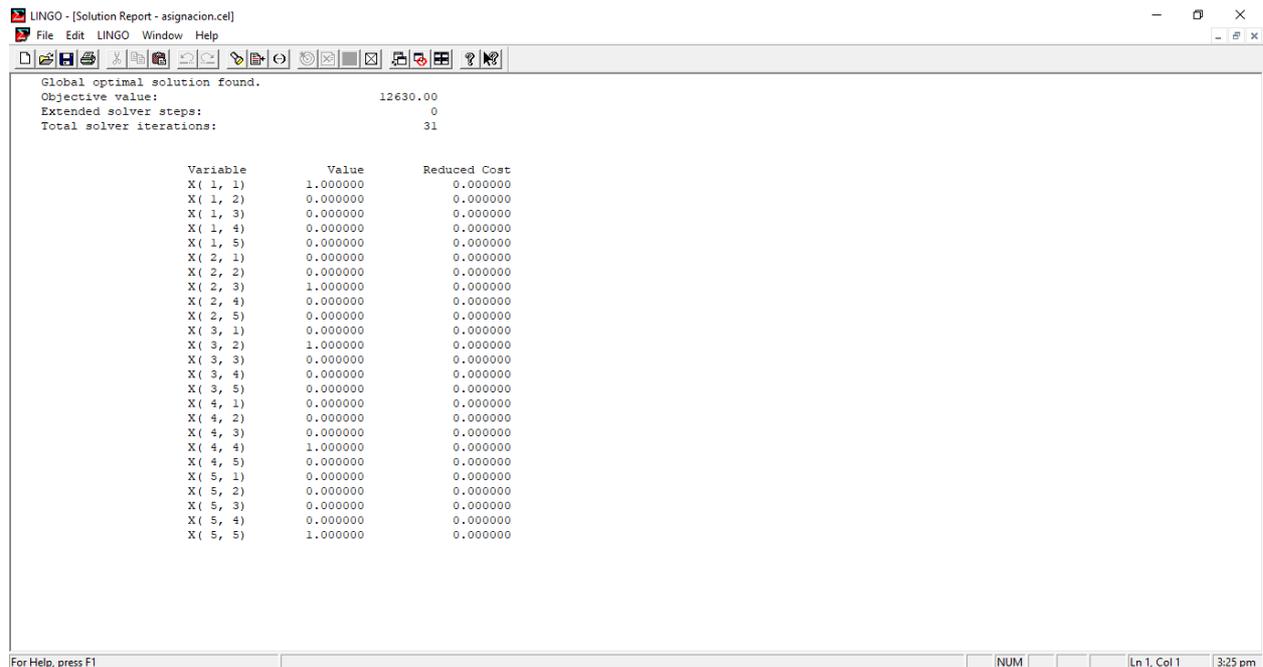


Ilustración 24.- Solución de modelado para la localización de células

Como vemos en la pantalla anterior la célula 1 se ubicaría en la localización 1, la célula 2 a la localización 3, la célula 3 a la localización 2, la célula 4 a la localización 4 y la célula 5 a la localización 5.

Esto nos da un valor de 12.630 metros recorridos como mínimo de distancia con los datos introducidos.

Por lo tanto, las localizaciones finales quedarían como en la siguiente representación:

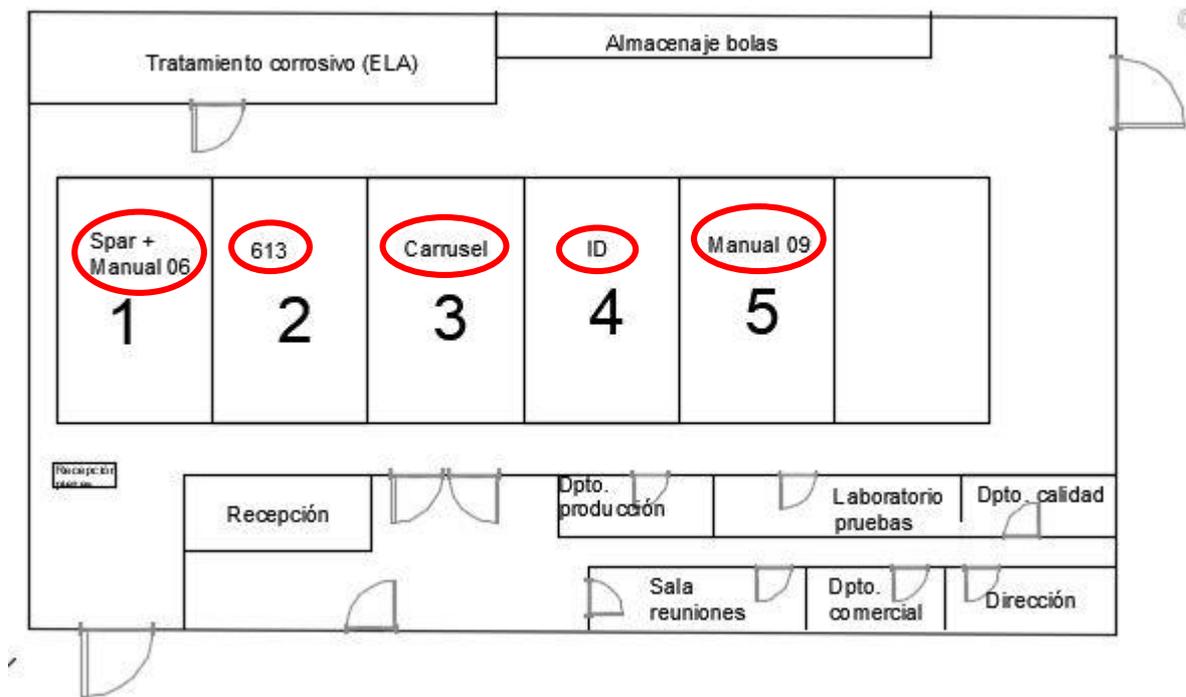


Ilustración 25.- Localización final de células

7 SIMULACIÓN DISCRETA

Por último, se ha simulado el proceso con la herramienta Arena. Esta herramienta permitirá comparar diferentes escenarios, dando como resultado final el tiempo de simulación, la prueba para ver si los pasos seguidos por el método de mejora de la fabricación celular han resultado en una reducción del tiempo total o no. Se simulará 1 año de procesado, suponiendo éste un intervalo suficiente de muestreo.

7.1 Casos de aplicación de la simulación.

Para ello se han generado 3 modelos diferentes, cada uno de ellos se corresponde con una forma de agrupar las máquinas en células, exponiendo así los diferentes casos que se pueden dar, para comprobar en los resultados sus similitudes y diferencias.

7.1.1 Primer caso: 1 célula

El primero se corresponde con el caso extremo de agrupación de células, en este caso la planta entera se considera como una célula de trabajo, esto hará que los transportes intercelulares sean nulos, sin embargo, se harán muchos transportes intracelulares innecesarios.

Se observa que este modelo es el menos eficiente, ya que, en este caso, las piezas no realizan una cantidad de movimientos entre máquinas tan elevado como para que la solución de crear una sola célula sea viable.

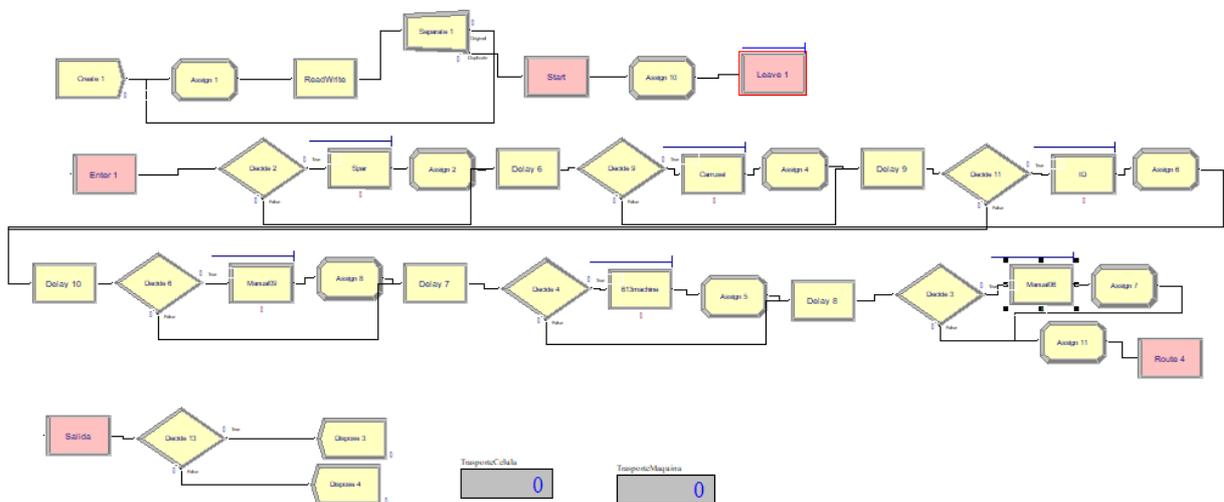


Ilustración 26.- Modelado de escenario célula única

7.1.2 Segundo caso: 6 células

Por otro lado, se considera el caso extremo contrario, en el que se considera cada máquina como una célula independiente, en este caso no se realizará ningún transporte intracelular, aunque los transportes intercelulares serán bastante frecuentes. Esto reducirá significativamente el tiempo total de procesado, ya que las colas se reducen considerablemente.

Esto se debe a la disposición de los datos. Si se observa de forma ordenada se ve que hay pocos part-numbers que compartan máquina en su ruta, un total de 155 piezas que comparten la máquina spar y la manual 06 (metal) y otras rutas poco representativas. Por lo que esta es una buena solución, cumple los plazos previstos, es intuitiva

y práctica, de hecho, es la que se utiliza actualmente en la planta de trabajo, que utiliza un layout de células independientes.

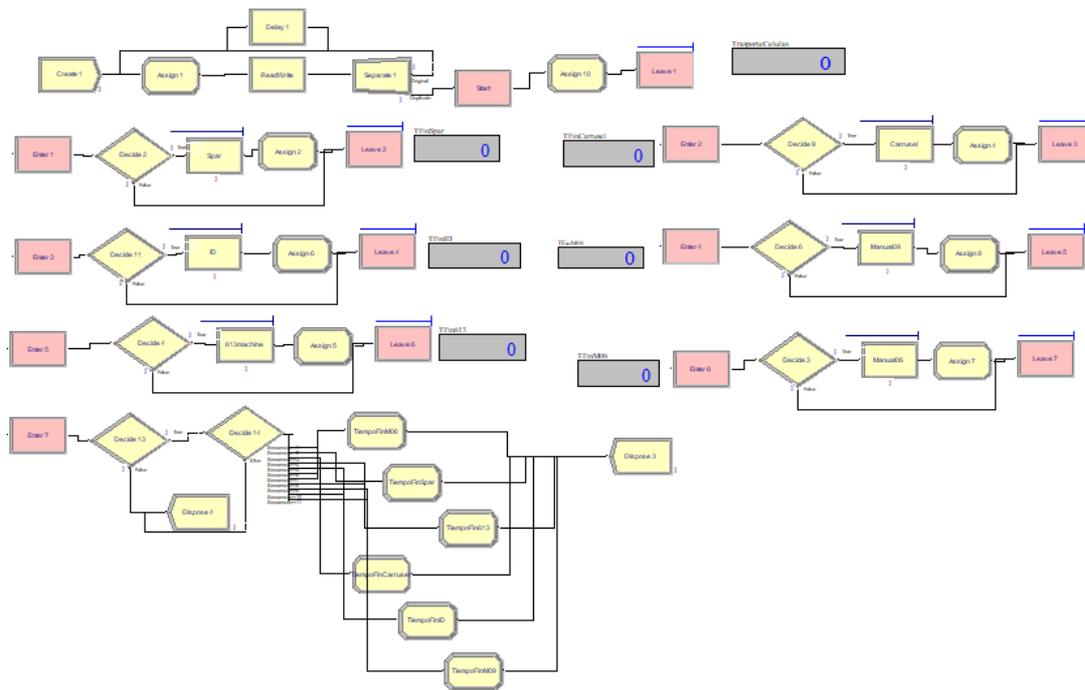


Ilustración 27.- Modelado de escenario células independientes

7.1.3 Tercer caso: 5 células

Por último, se simula el modelo propuesto por los métodos anteriormente utilizados, que se deberá corresponder con la solución óptima de combinaciones entre movimientos intercelulares e intracelulares. Esta solución se compone de 5 células, en las que se agrupan la máquina Spar y Manual 06.

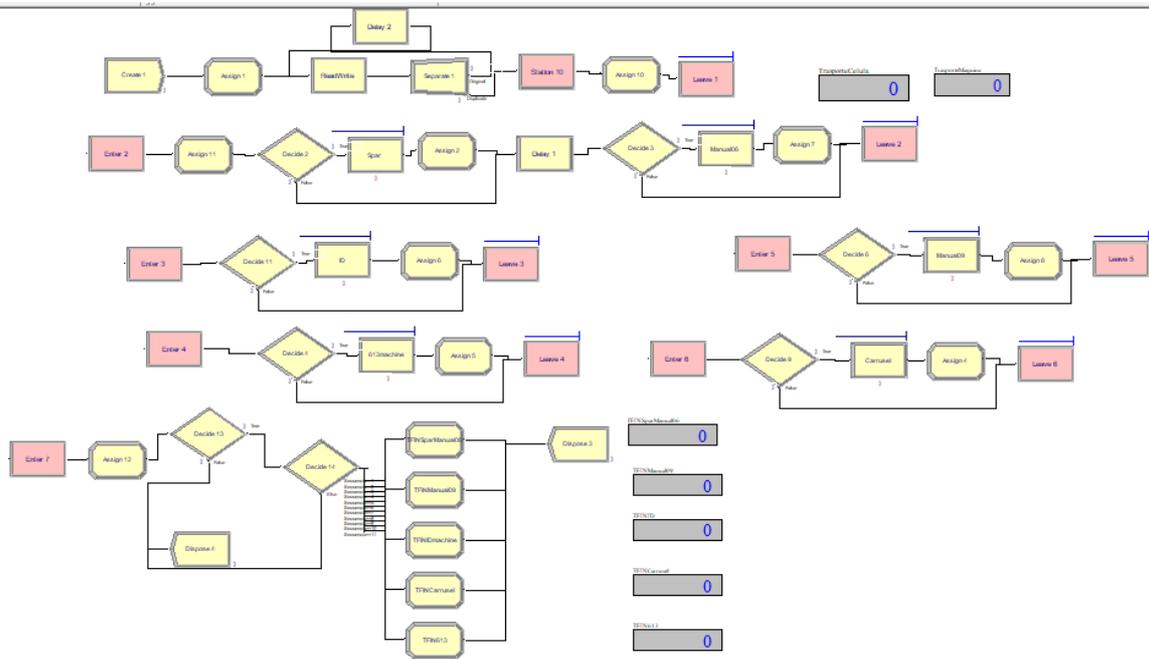


Ilustración 28.-Modelado de escenario 5 células

A continuación se explica el modelo desarrollado en Arena.

7.2 Llegada de piezas.

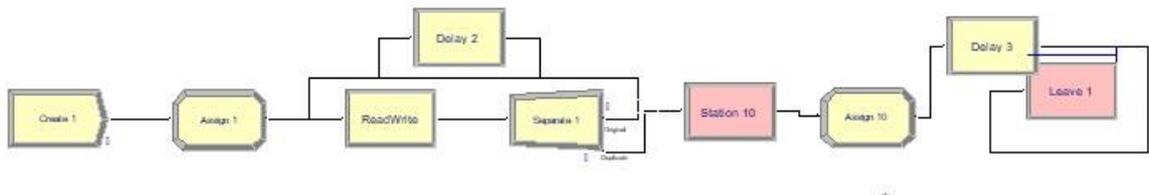


Ilustración 29.- Estructura llegada de piezas

Es uno de los grandes problemas, debido a que la misma concepción de la empresa impide una previsión de la demanda estable. La empresa tiene una metodología de trabajo por pedido, además, al ser un tratamiento superficial en la propia pieza proveniente de otro fabricante no se puede empezar el proceso hasta que esta no llega a la planta. Este es uno de los principales problemas y lo que hace que sea tan difícil realizar una simulación, para hacerla hay varias opciones.

- Estimar una demanda: Debido al elevado número de part-numbers que maneja la empresa y a la variabilidad de estos en los pedidos, siendo muy usual que haya nuevos part-numbers cada mes, esta opción parece poco efectiva.
- Trabajar con una demanda basada en un intervalo de tiempo controlado. Basándonos en los datos históricos se puede realizar una simulación, comparando los tiempos y las mejoras, haciendo que nos sirva este intervalo controlado como entorno de estudio. El problema de esta opción es que es muy importante escoger bien el intervalo de tiempo seleccionado, ya que si es demasiado pequeño puede resultar poco representativo y si es demasiado grande será muy complicado trabajar con un paquete de datos tan elevado.

La opción escogida será trabajar en un entorno controlado de 1 año.

7.3 Recogida de datos de matriz Excel.

Este bloque deberá reconocer el número de part-number que entra y aplicarle el valor 1 o 0 a cada atributo, leyendo el excel de la matriz que relaciona los part-numbers con las máquinas.

Si, por ejemplo, el part-number que entra en el proceso pasa por la spar, se le dará al atributo spar el valor 1, si no se le asignará el valor 0.

El programa debe reconocer la información para trabajar con ella. Esto se hace mediante el módulo **ReadWrite**, que recibe la información de un formato excel y la procesa en el modelo. En este caso la lectura del excel será la mostrada más abajo, siendo cada columna los siguientes conceptos.

7.3.1 Atributos de la matriz Excel

Máquina: A cualquiera de las 6 máquinas que componen la planta de procesamiento (Spar, Carrusel, ID, 613, Manual 06 y Manual 09) se le asigna un valor binario que indica si a la pieza le correspondería ser procesada en la máquina correspondiente o no.

Tmáquina: Corresponde a un tiempo de procesamiento estimado, para la pieza correspondiente con la fila y la máquina correspondiente con la columna.

Secuencia: La información anterior es útil, sin embargo, en este modelo se usa un nuevo parámetro llamado secuencia, en la que se le asigna un número identificativo a cada posible ruta que realizan las diferentes piezas. Por ejemplo, la secuencia 1 correspondería a la secuencia Spar + Manual 06.

Como vemos en la siguiente imagen, este parámetro se puede utilizar, introduciendo manualmente las secuencias en el modelo y asignándole a cada una de ellas un valor. Esto hará que el programa sepa dirigir a cada pieza por las diferentes stations, siguiendo la ruta correspondiente.

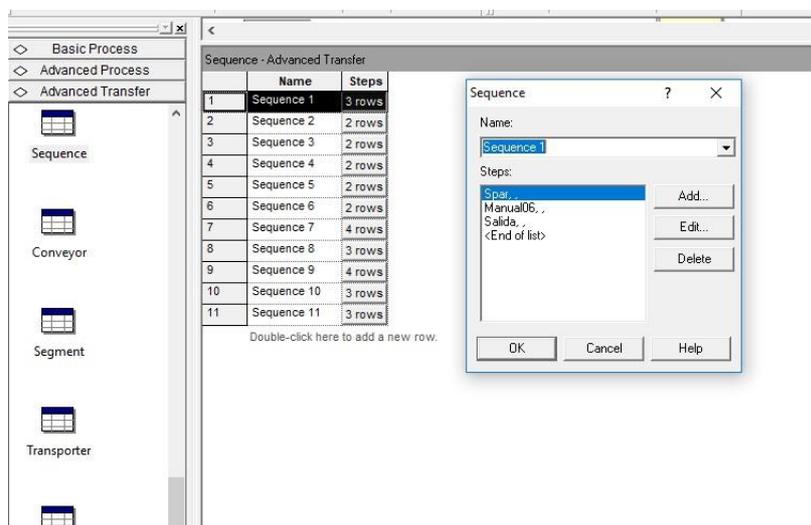


Ilustración 30.- Secuenciación de lectura de datos

Fecha: Corresponde al número de días de diferencia entre la primera pieza que se introduce en el sistema, con la pieza a la que se le están asignando los atributos. Esto se va a utilizar para introducir el atributo posteriormente en un delay y simular que las piezas entran consecutivamente con los plazos reales, esto hará que surgan colas y tiempos de espera más reales.

Lote: Cada línea se corresponde con un pedido diferente, dentro de cada pedido, la cantidad de piezas que se procesan puede variar. Siendo estas piezas la misma hoja de proceso y por lo tanto la misma ruta, lo más

práctico para no crear unidades innecesarias es multiplicar el tamaño de lote por el tiempo de proceso.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	ID	Spar	spa	Carrusel	rrru	613	T613	ID	TID	Manual06	M06	Manual09	M09	Manual10	M10	Fecha	Lote	Hoja Proc.	Fecha	F. Fin
2	4	0	75	1	21	0	23	0	83	0	48	0	98	3	0	435	S/0746	29/12/2016	11/01/2017	
3	5	0	42	1	14	0	27	0	44	0	45	0	138	3	0	488	S/0992	29/12/2016	09/01/2017	
4	6	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	0	1	S/1035	29/12/2016	29/12/2016	
5	7	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	0	1	S/1035	29/12/2016	29/12/2016	
6	8	1	82	0	29	0	19	0	103	1	46	0	86	1	1	22	S/1159	30/12/2016	09/01/2017	
7	9	0	23	0	16	1	23	0	71	0	54	0	78	4	11	11	S/0564	09/01/2017	09/01/2017	
8	10	0	21	1	23	0	27	0	93	0	49	0	121	3	11	1260	S/0754	09/01/2017	10/01/2017	
9	11	1	41	0	23	0	21	0	49	1	52	0	176	1	11	3	S/1179	09/01/2017	09/01/2017	
10	13	1	53	0	18	0	17	0	101	1	59	0	86	1	11	6	S/0876	09/01/2017	10/01/2017	
11	14	1	19	0	27	0	28	0	39	1	50	0	84	1	11	4	S/0932	09/01/2017	10/01/2017	
12	15	1	116	0	18	0	28	0	69	1	53	0	177	1	11	3	S/0996	09/01/2017	09/01/2017	
13	16	1	116	0	18	0	28	0	69	1	53	0	177	1	11	3	S/0996	09/01/2017	09/01/2017	
14	17	1	87	0	28	0	30	0	50	1	48	0	113	1	11	3	S/0987	09/01/2017	09/01/2017	
15	18	1	87	0	28	0	30	0	50	1	48	0	113	1	11	3	S/0987	09/01/2017	09/01/2017	
16	19	0	97	0	27	0	17	0	52	1	54	0	74	6	11	1	S/1251	09/01/2017	10/01/2017	
17	20	0	97	0	27	0	17	0	52	1	54	0	74	6	11	1	S/1251	09/01/2017	10/01/2017	
18	21	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	11	1	S/1035	09/01/2017	10/01/2017	
19	22	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	11	1	S/1035	09/01/2017	10/01/2017	
20	23	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	11	1	S/1035	09/01/2017	10/01/2017	
21	24	0	19	0	28	0	23	0	72	1	46	0	125	6	11	1	S/1035	09/01/2017	10/01/2017	
22	25	0	22	0	14	0	22	0	103	1	50	0	81	6	11	1	S/1107	09/01/2017	10/01/2017	
23	26	1	55	0	19	0	23	0	61	0	54	0	168	2	11	1	S/1082	09/01/2017	09/01/2017	
24	27	1	55	0	19	0	23	0	61	0	54	0	168	2	11	1	S/1082	09/01/2017	09/01/2017	
25	28	1	24	0	26	0	30	0	90	1	55	0	145	1	11	1	S/1250	09/01/2017	09/01/2017	
26	29	1	24	0	26	0	30	0	90	1	55	0	145	1	11	1	S/1250	09/01/2017	09/01/2017	
27	31	0	119	1	15	0	23	0	110	0	56	0	63	3	11	67	S/1255	09/01/2017	10/01/2017	

Ilustración 31.- Formato Excel lectura de datos

7.3.2 Módulos para leer Excel

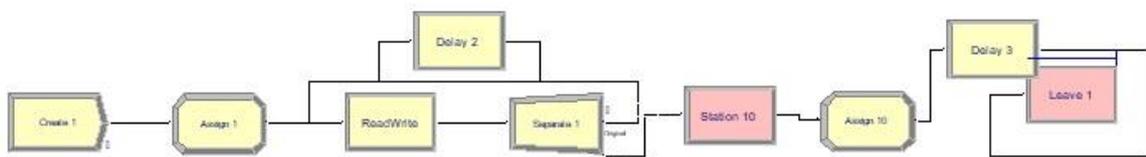


Ilustración 32.- Estructura lectura de Excel

El primer módulo (**Create**) crea una sola pieza, que posteriormente se irá duplicando hasta conseguir las piezas correspondientes con las que trabajará el modelo.

En el segundo módulo (**Assign**) se le asignarán a las piezas atributos estándar, como un contador para identificar el número de pieza, o algún tiempo de proceso que no depende de la pieza ni de la posición en planta (como por ejemplo el tiempo de proceso entre máquinas, que se ha supuesto igual).

El tercer módulo (**ReadWrite**) será el que lea el documento excel, se usará la opción “Read from file” y se le indicará que el fichero correspondiente es el que se quiere leer (anteriormente introducido en el apartado file, donde se indica el correspondiente recordset). Este módulo almacena la información de la primera línea y se la asigna a la primera pieza y así sucesivamente. La información se va almacenando por orden, es decir, la información de la primera columna se la asignará al primer atributo (RutaSpar), la de la segunda al segundo atributo (TProcesoSpar) y así se van asignando hasta finalizar con los atributos correspondientes.

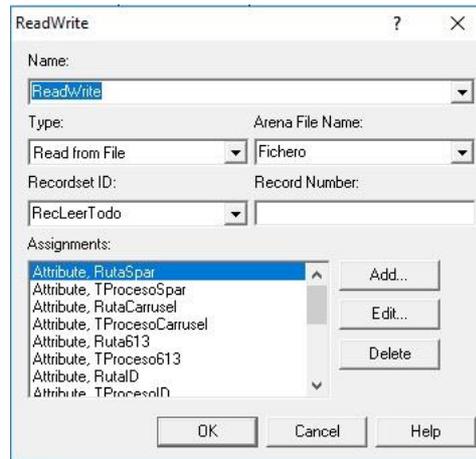


Ilustración 33.- Campos módulo ReadWrite

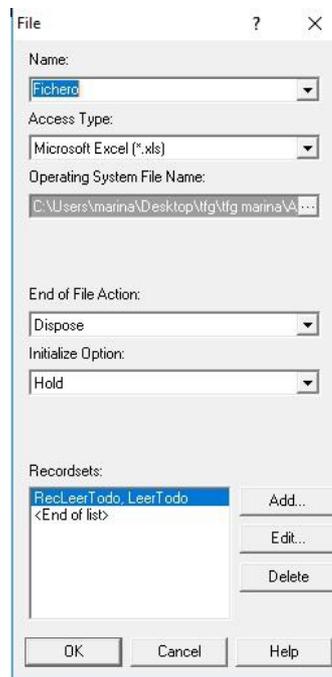


Ilustración 34.- Campos módulo File

Para pasar asignarle los atributos a la siguiente pieza se utiliza el módulo **Duplicate**. Esto hará que una de las piezas vuelva a realizar el proceso por la asignación de los atributos y la otra comience la simulación.

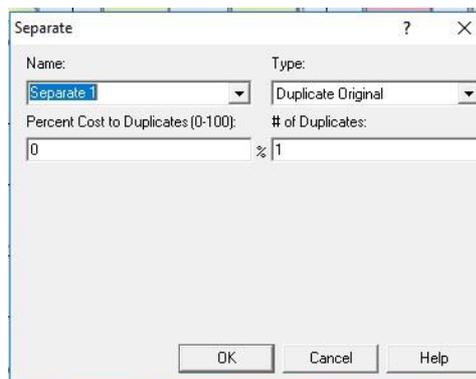


Ilustración 35.- Campos módulo separate

Todo el proceso descrito se realiza en el tiempo de simulación $T=0$, ya que es tiempo de lectura de datos, pero no tiempo de proceso como tal, para que no surga ningún problema en la simulación se le ha asignado un pequeño **Delay**.

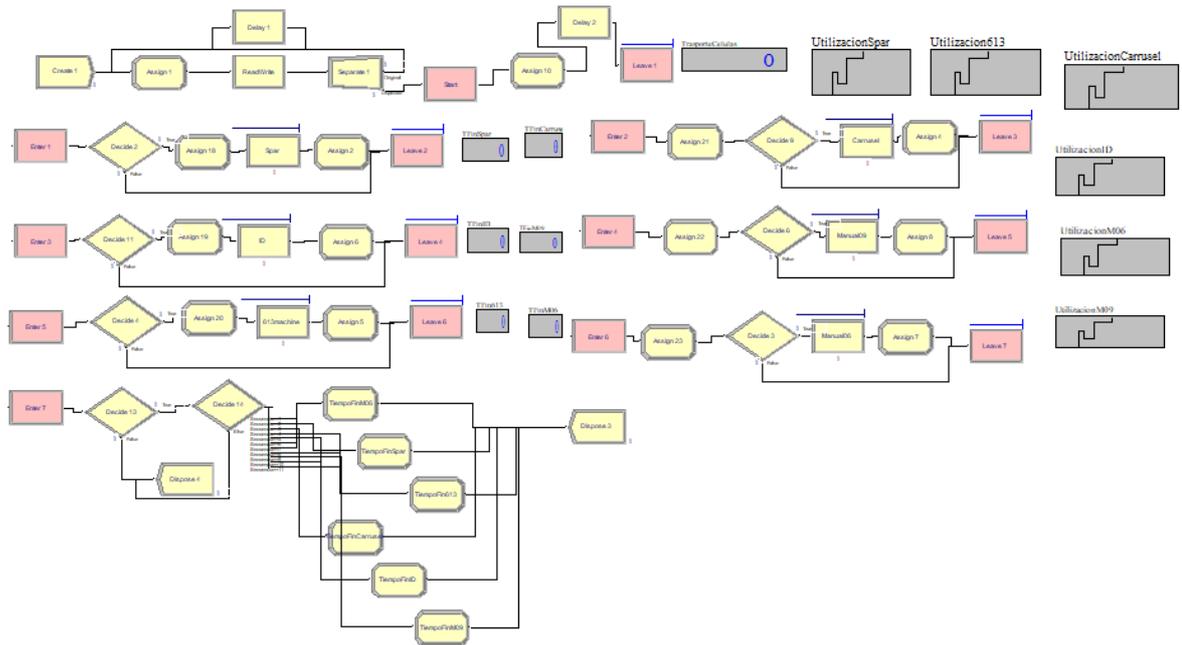


Ilustración 36.- Estructura general modelo

7.4 Células.

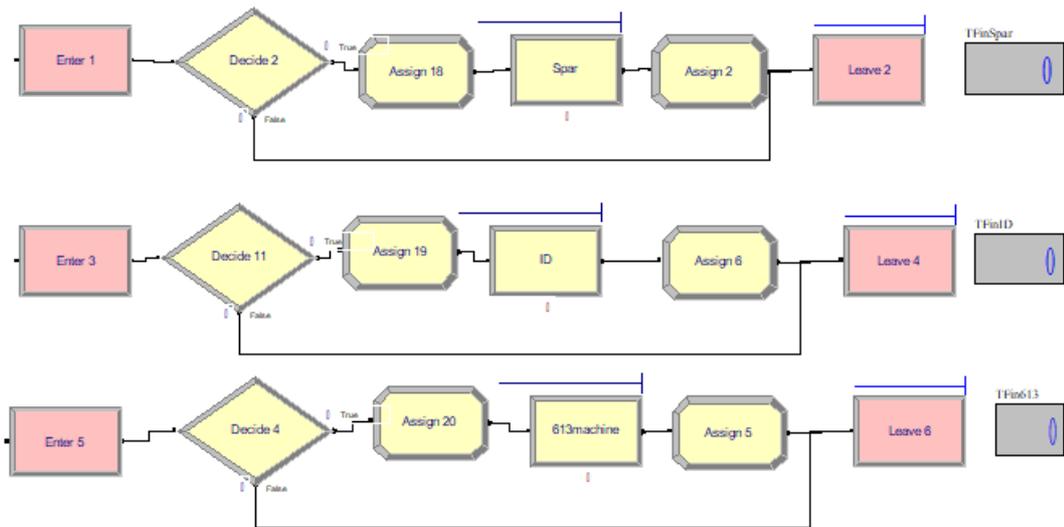


Ilustración 37.- Estructura células de trabajo

La estructura en la simulación que se corresponderá a cada célula se compone de:

7.4.1 Módulo station

Este módulo se utiliza para que la pieza vaya siguiendo la ruta correspondiente, cada pieza tiene un atributo asignado llamado secuencia, y cada número de secuencia tiene asignadas las localizaciones a las que debe dirigirse.

7.4.2 Módulo decide

Este módulo busca el atributo RutaMáquina y comprueba que la pieza debe pasar por esa máquina. Es útil cuando una misma célula contiene más de un proceso, ya que puede ocurrir que una pieza deba pasar por la célula, pero dentro de esta célula no requiera procesado en todas las máquinas que la componen.

No sería necesario en el caso 2, en el que se consideran 6 células, una para cada máquina, ya que, en esta estructura, si mediante la secuenciación se ha decidido ir a esa célula es porque necesita procesado en la máquina que la compone. Aún así se ha decidido dejar los módulos para realizar una segunda comprobación, vemos que funciona correctamente ya que el recuento de piezas que pasan por el lado falso del decide es igual a 0.

7.4.3 Assing antes y después de procesado

Sirve para llevar un control de la utilización a lo largo de toda la simulación de las máquinas. Para ello se crea una variable (UtilizaciónMáquina) que se incrementará cuando entre una pieza en procesado y disminuirá cuando salga de él, por lo que mientras el valor de la variable sea mayor que 1 significa que la máquina se está utilizando.

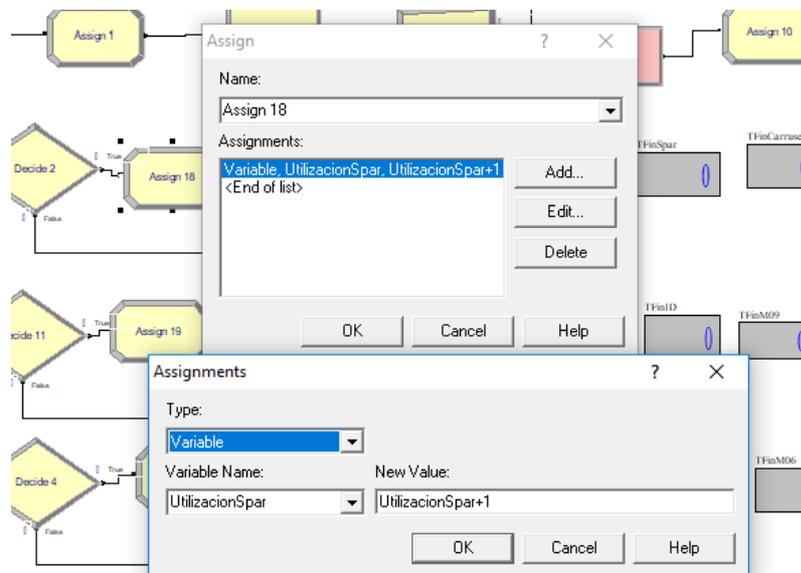


Ilustración 38.- Parámetros Assign

7.4.4 Procesado

Tiempo de proceso: Para simular el tiempo de procesado se utiliza una función que multiplica el tiempo de procesado leído previamente en el documento Excel, en el cual asignábamos un tiempo para cada proceso y máquina por el tamaño de lote. Depende del funcionamiento del procesado también se añade en muchos casos un factor que divide el resultado, ya que en la mayoría de los casos las piezas entran en las máquinas por lotes, de entre 5-12 piezas. Esto está explicado posteriormente en el apartado capacidad.

Otro de los grandes problemas de esta simulación es la estimación de los procesos de cada part-number en cada máquina, como esto es muy complicado, ya que no hay un control exhaustivo se realizará una estimación basándonos en las fechas de entrada y salida de la pieza. No obstante la empresa está desarrollando un programa de control de tiempos mediante las picadas de los operarios, que podría facilitar mucho el estudio de la empresa, mejorando la eficiencia de ésta.

Recursos: A cada máquina debe asignársele un operario, aunque en este caso el objeto de estudio es la disposición de las máquinas, por lo que consideramos los recursos de los operarios como no saturados. Por ello se ha considerado un operario asignado a cada máquina siempre disponible para ella.

Capacidad: Cada máquina admite un número diferente de piezas en ella, para tener en cuenta esto, lo que se ha hecho es dividir el tiempo de procesado por el número de piezas que caben en la máquina en concreto.

Tabla 8.- Capacidad de piezas por máquina

Máquina	Capacidad (piezas)
Spar	4
Carrusel	8
ID	1
613	6
Manual 06	1
Manual 09	1

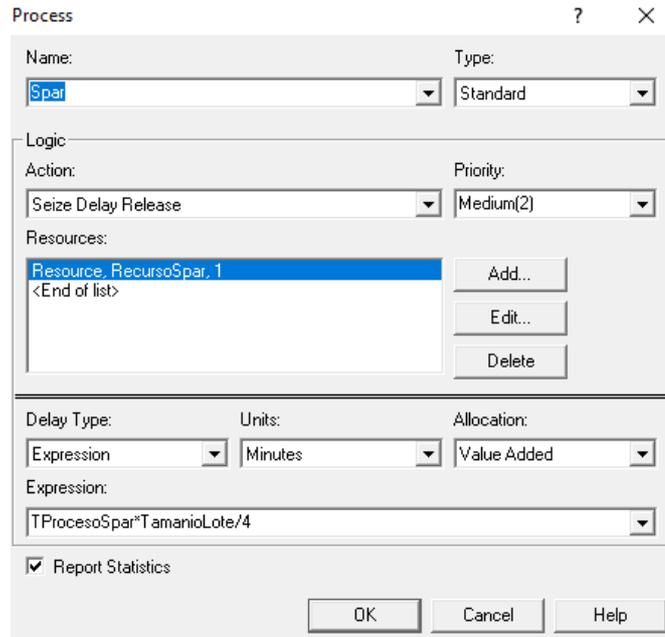


Ilustración 39.- Parámetros proceso

7.5 Salida de las piezas.

Por ultimo, se crea el Station final, en el que se le asigna a cada máquina su tiempo de finalización. Esto se hace mediante un modulo **Decide**, que irá separando cada rama, mediante el atributo secuencia, la última pieza por la que ha pasado la pieza que se acaba de tratar.

Posteriormente se le asigna al atributo de tiempo de finalización el tiempo actual, que se irá modificando por cada pieza que pase. Al acabar el procesado se tendrán los tiempos de finalización de cada máquina. Combinando esta información con las cargas de trabajo se podrá ver el balance de carga de las máquinas, viendo que hay algunas que podrían soportar una carga mayor y otras que se encuentran con un porcentaje de utilización más alto.

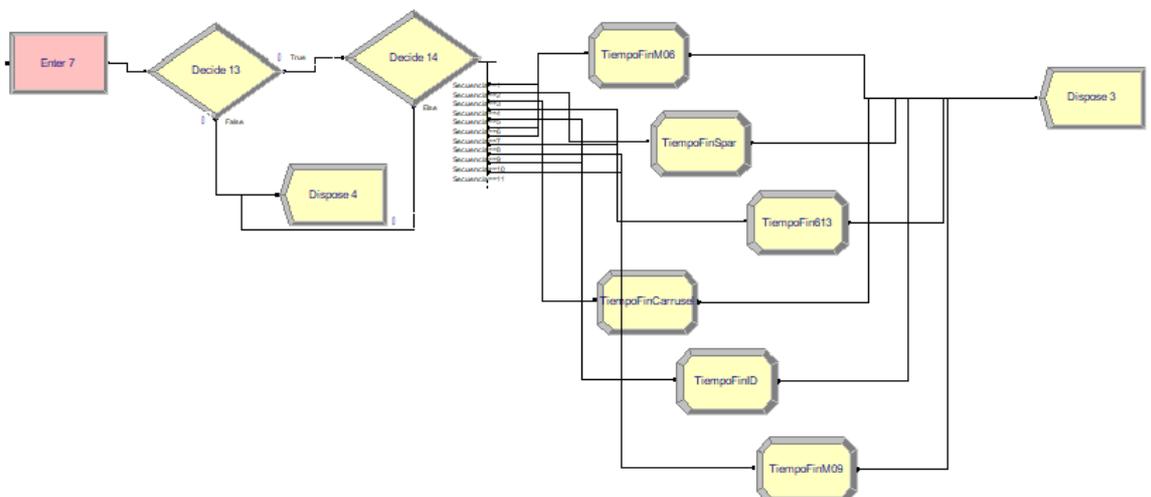


Ilustración 40.- Estructura salida de piezas

8 RESULTADOS SIMULACIÓN

En este apartado se recogen los resultados de la simulación, los cuales se analizarán en el apartado 9 de conclusiones, dando también futuras líneas de trabajo que podrían mejorar el sistema.

Las horas de trabajo para cada máquina se pueden calcular fácilmente, sabiendo las rutas de cada pieza y su tiempo de procesado.

Tabla 9.- Cargas de trabajo por máquina

Máquina	Tiempo de procesado (horas)
Spar	568
Carrusel	931
ID	625
613	536
Manual 06	2163
Manual 09	91

Por lo tanto, por mucho que se mejore el balance de cargas de las máquinas, en esta simulación, el tiempo total de procesado (makespan) siempre será mayor o igual a 2163 horas, ya que esto se corresponde a la máquina con tiempo de procesado más elevado.

8.1 Resultados célula única.

8.1.1 Utilización de recursos

Tabla 10.- Utilización de recursos en escenario de célula única

Identifier	Average	Half width	Minimum	Maximum	Final value
RecursoSpar	0,26165	Corr	0	1	0
RecursoCarrusel	0,42928	Insuf	0	1	0
RecursoID	0,28800	Insuf	0	1	0
Recurso613	0,12349	Insuf	0	1	0
RecursoManual06	0,99667	Corr	0	1	0
RecursoManual09	0,04285	Insuf	0	1	0

8.1.2 Tiempo de procesado

Tiempo total de procesado (makespan): 2170,5583 horas

En este caso, al ser una única célula, el tiempo total de procesado y el tiempo total de fin de célula coinciden, aunque en los escenarios siguientes también se contempla el tiempo de procesado correspondiente a cada célula.

8.1.3 Número de transportes inter e intra celulares

Transportes intercelulares: 2090.

En este caso los transportes intercelulares se corresponden a los transportes de entrada y salida, ya que no existen transportes entre células.

Transportes intracelulares:5225.

Los transportes intracelulares son muy ineficientes, ya que todas las piezas pasan por todas las máquinas, esto hace que el número sea demasiado elevado.

8.2 Resultados células independientes.

8.2.1 Utilización de recursos

Tabla 11.- Utilización de recursos en escenario de células independientes

Identifier	Average	Half width	Minimum	Maximum	Final value
RecursoSpar	0,26163	(Corr)	0	1	0
RecursoCarrusel	0,42925	(Insuf)	0	1	0
RecursoID	0,28798	(Insuf)	0	1	0
Recurso613	0,12348	(Insuf)	0	1	0
RecursoManual06	0,99661	(Insuf)	0	1	0
RecursoManual09	0,04231	(Insuf)	0	1	0

8.2.2 Tiempo de procesado

Tiempo total de procesado (makespan): 2170,6918 horas.

Como se puede observar se ha reducido considerablemente el tiempo de proceso final. Esto se debe a la reducción de transportes intracelulares.

Célula 1 / Spar: 479 horas

Célula 2 /Carrusel: 930 horas

Célula 3 /ID: 694 horas

Célula 4 /613: 458 horas

Célula 5 /Manual 06: 2170 horas

Célula 6 /Manual 09: 1373 horas

Observamos en los tiempos de finalización, que la primera máquina en finalizar es la célula 1, la Spar. Por otro lado, la última en finalizar y, por lo tanto, la que marca el final del tiempo total de simulación, sería la célula 5, compuesta de la manual 06. En este caso, reduciendo el tiempo final de procesamiento de esta máquina, se reducirá el tiempo total.

8.2.3 Número de transportes inter e intra celulares

Número de transportes intercelulares: 2761 transportes

Número de transportes intra celulares: 0 transportes

8.3 Resultados 5 células.

8.3.1 Utilización de recursos

Tabla 12.- Utilización de recursos en escenario de 5 células

Identifier	Average	Half width	Minimum	Maximum	Final value
RecursoSpar	0,26163	(Corr)	0	1	0
RecursoCarrusel	0,42924	(Insuf)	0	1	0
RecursoID	0,28798	(Insuf)	0	1	0
Recurso613	0,12348	(Insuf)	0	1	0
RecursoManual06	0,99659	(Corr)	0	1	0
RecursoManual09	0,04231	(Insuf)	0	1	0

8.3.2 Tiempo de procesado

Tiempo total de procesado (makespan): 2170,7251 horas.

En este caso no hay una mejora significativa del tiempo total de procesamiento con respecto al escenario de células independientes.

Célula 1 / Spar + Manual 06: 2170 horas

Célula 2 /Carrusel: 930 horas

Célula 3 /ID: 732 horas

Célula 4 /613: 458 horas

Célula 5 /Manual 09: 1395 horas

8.3.3 Número de transportes inter e intra celulares

Número de transportes intercelulares: 2746 transportes

Número de transportes intra celulares: 838 transportes

9 CONCLUSIONES

Al realizar este estudio se observa que la mejora con respecto al tiempo no es significativa. Esto se debe a que las cargas de trabajo en las máquinas no están equilibradas y los tiempos de espera por colas en las máquinas son mayores a los tiempos de transporte, por ejemplo, observamos que la máquina ID tiene uno de los procesos de finalización más altos, sin embargo, es una máquina poco cargada. Esto se debe a que hacia el final aparece una gran cantidad de piezas que procesar.

9.1 Posibles cambios en el modelo

Con un sencillo **cambio en la secuencia de los trabajos**, simplemente modificando la matriz de entrada de piezas se puede observar como mejora el tiempo final de procesado de esta célula.

Como prueba se ha hecho una pequeña modificación en la que, para el caso de 5 células se ha probado a poner al inicio de la matriz todas las piezas que se procesan en la célula 5 (máquina manual 09). Al hacer este cambio en los datos de entrada se obtiene una reducción del tiempo final de la célula en cuestión, manteniéndose el mismo tiempo total de simulación.

Los resultados de tiempos de procesados con el cambio en la secuencia de entrada serían los siguientes:

Tiempo total de procesado: 2170,7256 horas.

Célula 1 / Spar + Manual 06: 2170 horas

Célula 2 /Carrusel: 930 horas

Célula 3 /ID: 732 horas

Célula 4 /613: 458 horas

Célula 5 /Manual 09: 1395 → 1369 horas

Como se observa al realizar el cambio se obtiene una mejora en el tiempo final de procesado de la célula 5. Un estudio en este sentido puede mejorar los tiempos de proceso finales por células, buscando priorizar siempre la célula que tiene el tiempo de procesado más largo, ya que una mejora en esta célula, implicará una mejora en el sistema completo.

Por este motivo es interesante realizar un pequeño estudio de secuenciación, este estudio tendrá como resultado el mismo tiempo de proceso total, sin embargo, los tiempos de finalización por células serán bastante más reducidos, lo que permitiría introducir más carga de trabajo a las máquinas poco utilizadas.

Un estudio de tecnología de grupos sería más interesante en un modelo en el que los tiempos de transporte y de proceso estuvieran más equilibrados. Por ejemplo, si virtualmente y solo con el objeto de estudio elevamos los tiempos de transporte a valores similares a los tiempos de proceso para los tres casos observamos significativas mejoras al aplicar un modelo de layout por células. Sin embargo, no se muestran estos resultados en las conclusiones, debido a que la diferencia de tiempos de procesado imposibilita la comparación de resultado.

9.2 Futuras líneas de trabajo.

Se proponen dos principales líneas de mejoras que pueden ayudar a mejorar la eficiencia del modelo y de las células de trabajo.

Por una parte un estudio de **secuenciación**. Esta área está ampliamente investigada, por lo que se podría recoger información de diferentes estudios para conseguir un mejor resultado. Como se ha visto en el apartado anterior esto permitiría reducir los tiempos de finalización de cada célula, permitiendo así aumentar la carga en las máquinas que lo requieran. El problema de esta secuenciación es lo complicado que se hace un estudio de demanda en este tipo de empresa. Actualmente se trabaja con periodos de 1 mes. Por ejemplo, a día 1 de enero, se conocerán las piezas que se van a procesar hasta el 1 de febrero, a día 15 de enero, se conocerán las piezas a

tartar hasta el 15 de febrero. Por lo tanto esta solución necesitaría un cambio requisitos en los clientes, pidiendo a estos que soliciten el tratamiento con un intervalo de tiempo mayor, facilitando así la planificación de la empresa.

Por otro lado, se propone un cambio de **Setup en la máquina Manual 09** a bola de metal, esta máquina tiene uno de los tiempos de finalización más cortos. Si al acabar su procesado, se plantea cambiar a bola de metal y realizar parte de la demanda de la máquina manual 06, gracias a que las dos máquinas presentan las mismas características. Al ser la máquina Manual 06 la que determina el tiempo de procesado final, por ser la del tiempo de finalización mayor, esto resultaría en una reducción del tiempo de procesado del modelo completo.

Esta mejora queda fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, se considera la mejor solución una combinación de las dos líneas de trabajo, en la que se trata, con la secuenciación, reducir el tiempo de finalización de la célula 5, para así, aliviar la carga de la manual 06, perteneciente a la célula 1.

10 BIBLIOGRAFÍA

[1] Chan, C. Y., Lam, F. W., & Lee, C. P. (1999). Considerations for using cellular manufacturing. *Journal of Materials processing technology*, 96(1-3), 182-187.

[2] Suresh, N. C., & Kay, J. M. (Eds.). (2012). *Group technology and cellular manufacturing: a state-of-the-art synthesis of research and practice*. Springer Science & Business Media.

[3] Ignacio Eguía Salinas, Grupo de Tecnologías de la Información e Ingeniería de Organización. Dpto de Organización Industrial y Gestión de Empresas I. (2017). *Sistemas de Fabricación celular. Tecnología de grupos y Fabricación Celular*. Apuntes.

[4] Singh, N., & Rajamani, D. (2012). *Cellular manufacturing systems: design, planning and control*. Springer Science & Business Media.

[5] <https://www.wheelabratorgroup.com/es-es/my-application/application-by-process/what-is-shot-peening> (Última visita 8/02/2019)

[6] J. Ponce, G. Solis y L. Ulfe (2016). *Investigación de operaciones. Guía básica de LINGO*. Apuntes.

[7] <https://www.clarcat.com/arena/> (Última visita 8/02/2019)

11.1 Lingo. (Lineal Interactive and General Optimizer).

Es una herramienta que resuelve modelos de optimización tanto lineales como no lineales. Su lenguaje de programación es sencillo y su respuesta bastante rápida. [6]

11.1.1 Apartado SETS y DATA

En este apartado se dan de alta tanto las variables que se van a utilizar, los datos que se van introducir y los subíndices que serán necesarios para resolver el modelo. Estos conjuntos permitirán escribir los bloques de restricciones simplemente especificando el conjunto que debe repetirse.

Por ejemplo, si se tiene un conjunto de 4 camiones y se necesita que ninguna de las cargas supere un peso específico, bastará con crear el conjunto camiones (*sets*), crear el conjunto de cargas máximas para cada uno de los camiones (especificándolo en *sets* y rellenando los datos en *data*) y modelar una sola vez la restricción especificando los conjuntos que se desean utilizar. Este tipo de lenguaje facilita mucho la programación, ya que se plantea de una forma mucho más parecida al lenguaje matemático.

11.1.1.1 Tipos de conjuntos

- **Primitivos:** Los objetos fundamentales en un modelo, no es posible desmenuzarlos en objetos más pequeños.

Su sintaxis sería: **nombre_conjunto/ lista_miembros/ [: lista_atributos];**

- **Derivados:** Son creados a partir de otros conjuntos. Estos conjuntos de los que se compone el conjunto derivado, a su vez pueden ser primitivos o derivados.

Su sintaxis sería: **nombre_conjuto (lista_conjuntos_padres) [/especificaciones_lista_mienbros/] [: lista_atributos];**

11.1.2 Desarrollo del modelo

Como se ha comentado anteriormente, el lenguaje de programación de Lingo es muy intuitivo, en este apartado se explican algunas de las órdenes más utilizadas.

11.1.2.1 FOR

Se corresponde con el símbolo matemático \forall (para todo), por lo que, al escribir esta función en una restricción, el programa recorrerá, tantas veces como se especifique en el conjunto, toda la información que se introduzca dentro de la orden. Es muy útil para los conjuntos de restricciones anteriormente comentados.

- Sintaxis: **@for (nombre_conjunto (subíndice):)**

11.1.2.2 SUM

Se corresponde con el símbolo matemático Σ (sumatorio), recorre el conjunto especificado, sumando los valores de los datos introducidos en este, devolviendo como resultado la suma de todos ellos.

- Sintaxis: **@sum (nombre_conjunto (subíndice):)**

11.1.2.3 Max / Min

Al introducir esta orden en al inicio de una ecuación, Lingo entiende que estamos hablando de la función objetivo y busca la mejor solución para el modelo.

11.2 Arena Simulation

En este apartado se explicará el objetivo, funcionamiento y principales órdenes del software de simulación Arena. [7]

11.2.1 ¿Qué es?

Arena es un software de simulación de eventos discretos para la optimización de procesos complejos. El programa representa una serie de eventos previamente definidos y ordenados en el tiempo, formando así un sistema complejo. Esta representación permitirá analizar de una forma rápida y visual el comportamiento del proceso o sistema a lo largo del tiempo. También permite simular diferentes casos y escenarios, pudiendo así comparar los resultados entre ellos. Esta simulación es muy práctica a la hora de analizar los cuellos de botella en el sistema.

Arena Simulation se puede utilizar para:

- Solución visual de los efectos de un posible cambio en el proceso
- Evaluar posibles cambios en los procedimientos o escenarios sin interferir en el sistema actual
- Herramienta para diagnosticar los problemas actuales y posibles soluciones a aplicar
- Estudio de los cuellos de botella, para equilibrar los recursos destinados a los cuellos de botella correspondientes. Un buen análisis de cuellos de botella proporciona un sistema equilibrado, en el que una pequeña variación de variables cambia el cuello de botella de un proceso a otro ya que la diferencia entre estos es pequeña.
- Reducir el riesgo para las grandes inversiones en cambios. Antes de llevar a cabo la inversión, se realizaría el estudio para comprobar la rentabilidad del proyecto.

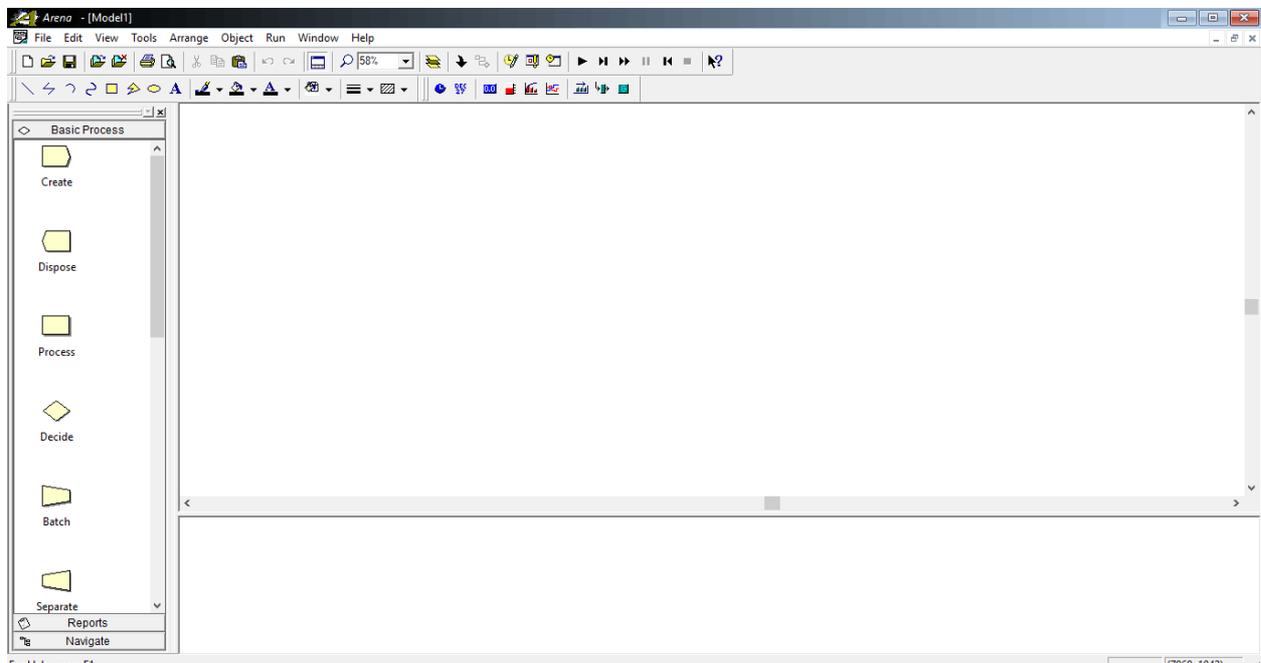


Ilustración 41.- Pantalla inicial Arena Simulation

11.2.2 Módulos

Las dos categorías principales de los módulos básicos son:

- **Flowchart modules:** son módulos que se relacionan con una acción concreta, se crea un recorrido de

módulos, unidos por enlaces. Las piezas van haciendo el recorrido y realizando las acciones necesarias en cada uno de ellos.

Los principales módulos tipo flowchart son:

- **Create:** Es un módulo que crea las piezas según los parámetros especificados. Se introduce un intervalo de tiempo, una función estadística o una programación determinada y el módulo crea piezas genéricas en el momento correspondiente.

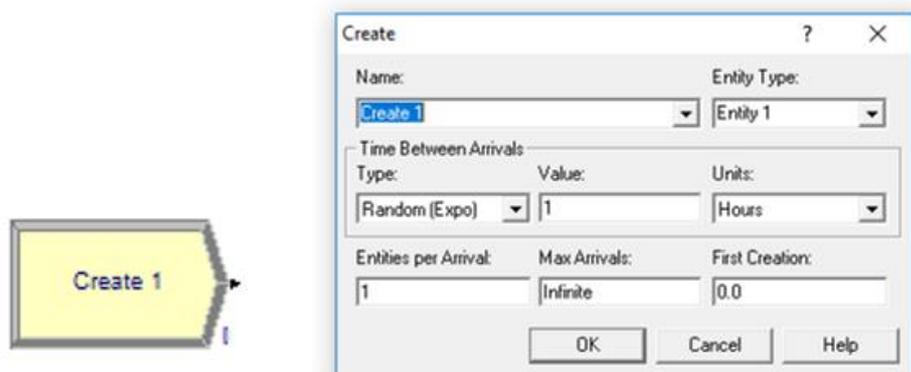


Ilustración 42.- Módulo create

- **Process:** Simula el procesamiento de una pieza, relacionando el tiempo de procesamiento que necesita y los recursos que utiliza.

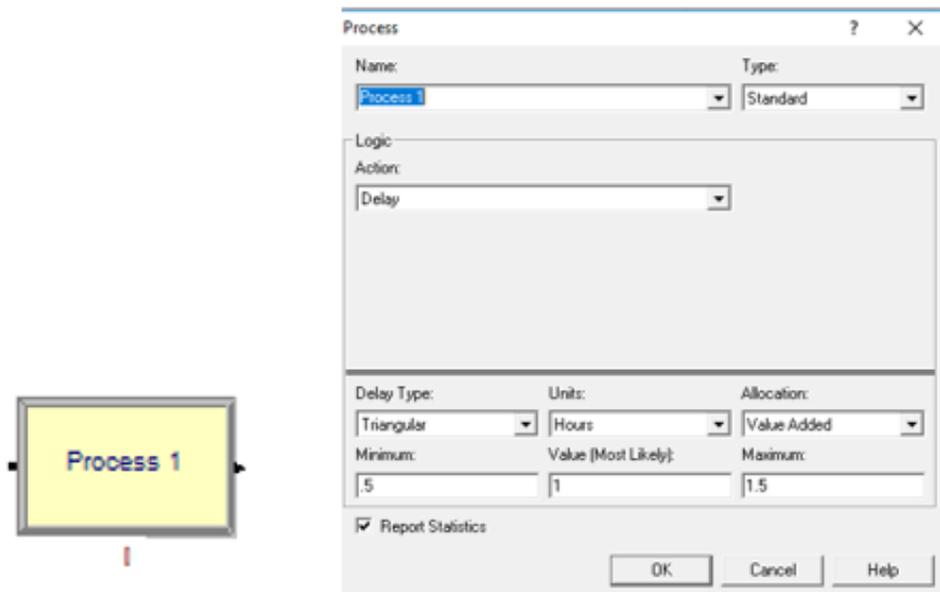


Ilustración 43.- Módulo process

- **Decide:** Mediante diferentes restricciones, este módulo deriva las piezas por un camino u otro, dependiendo de si las cumplen o no.

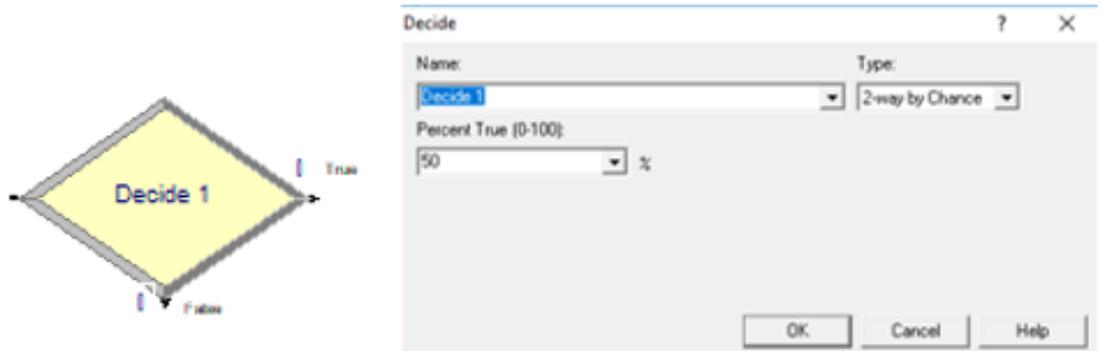


Ilustración 44.- Módulo decide

- **Dispose:** Es necesario colocar este módulo al finalizar cualquier línea de procesado.

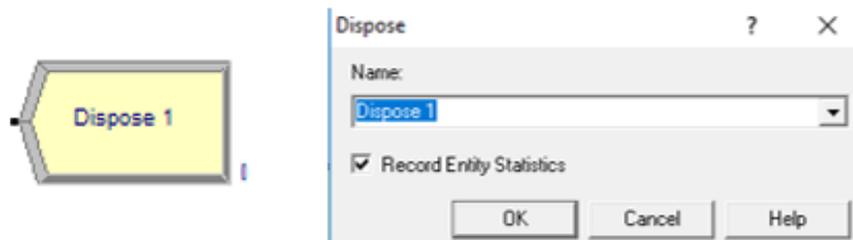


Ilustración 45.- Módulo dispose

- **Batch:** Se utiliza para, según diferentes restricciones, agrupar piezas, creando una sola unidad.

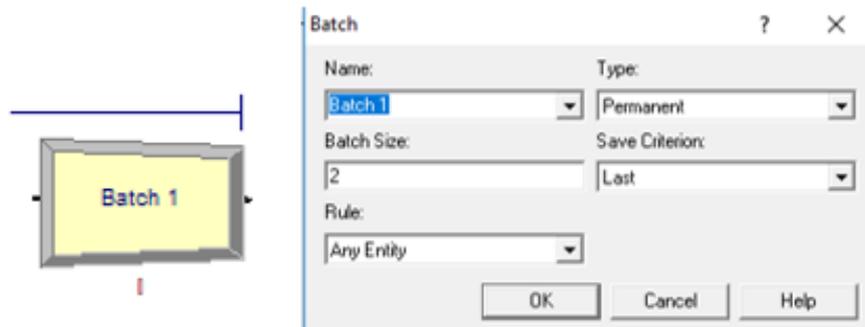


Ilustración 46.- Módulo Batch

- **Separate:** Se correspondería con el caso contrario del Batch. En este caso, se duplica la pieza con las características especificadas, según las restricciones exigidas.

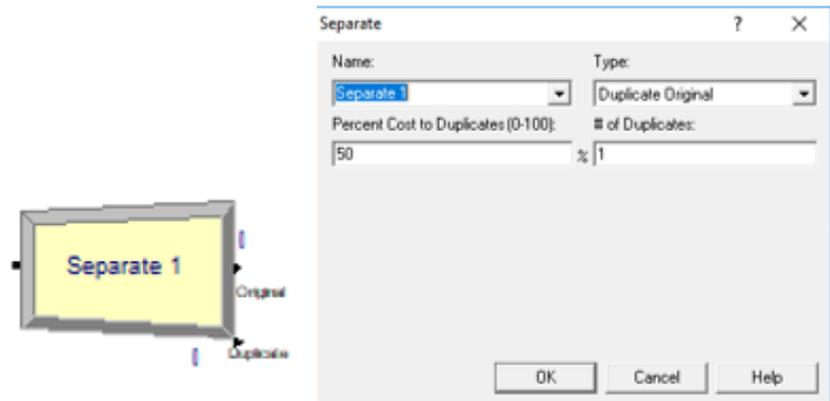


Ilustración 47.- Módulo separate

- **Assign:** Este módulo asigna atributos a la pieza, esto será muy útil para, por ejemplo, asignarle tiempos de procesamiento o características que se emplearán para tomar decisiones posteriormente.

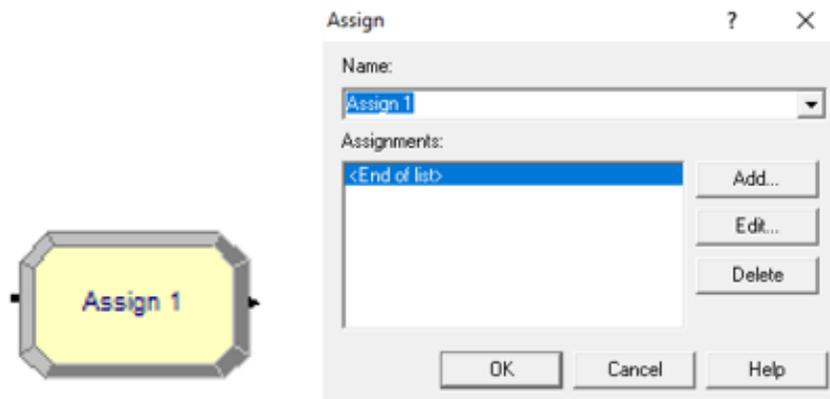


Ilustración 48.- Módulo assign

- **Record:** Este módulo registra las estadísticas de la pieza o entidad antes de que se elimine del sistema mediante el módulo dispose.

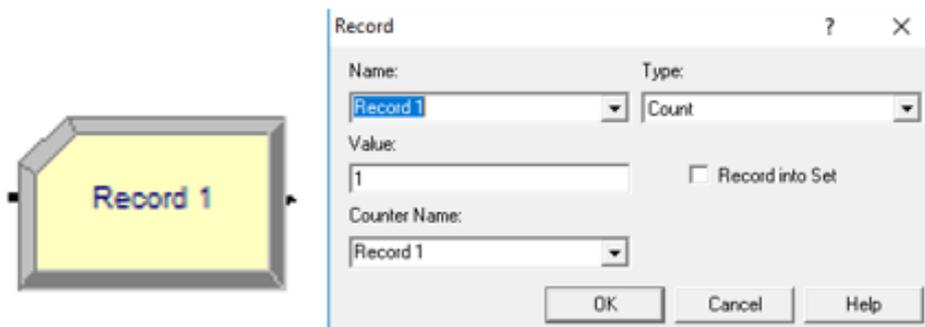


Ilustración 49.- Módulo record

- **Data modules:** Estos módulos no se pueden ver en la ventana de simulación, se corresponden a datos del modelo necesarios para el proceso, pero que no son imprescindibles para comprender el funcionamiento del modelo.
 - **Resource:** En este módulo se recoge la información de todos los recursos con los que trabaja

el modelo. Cada recurso contiene información asociada a él, tales como coste, disponibilidad del recurso, tasa de fallo o estados por los que puede pasar.

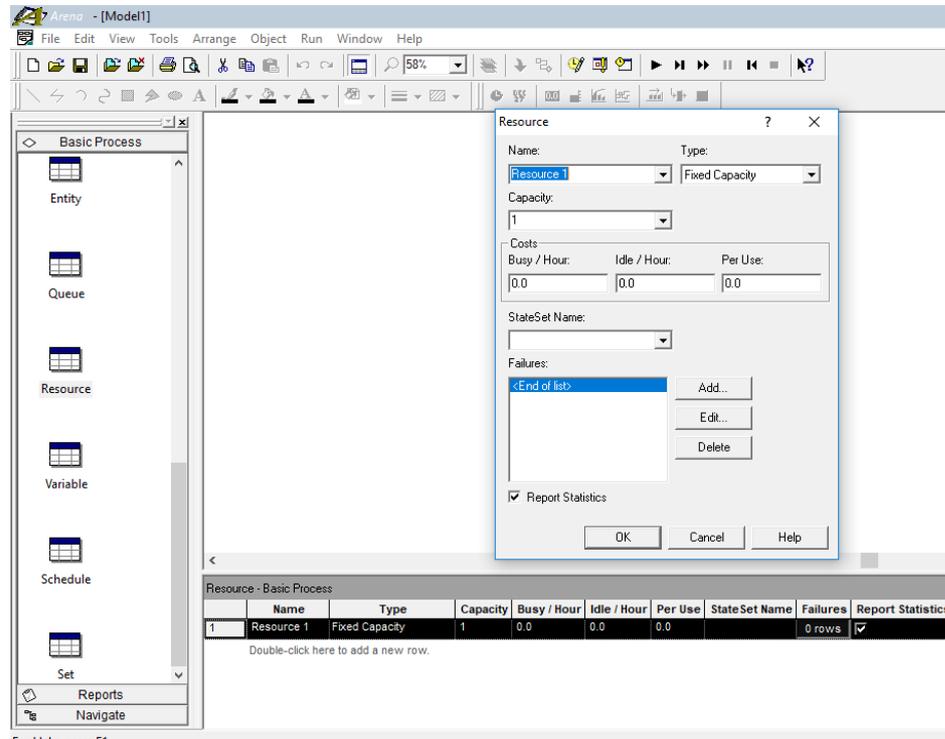


Ilustración 50.- Módulo resource

- **Queue:** Por defecto, Arena utiliza la regla FIFO (First In First Out) que propone que la cola se rija por el orden de llegada de las entidades. Este módulo permite cambiar esta regla, dando prioridad a un tipo de piezas o creando otras reglas para la cola.

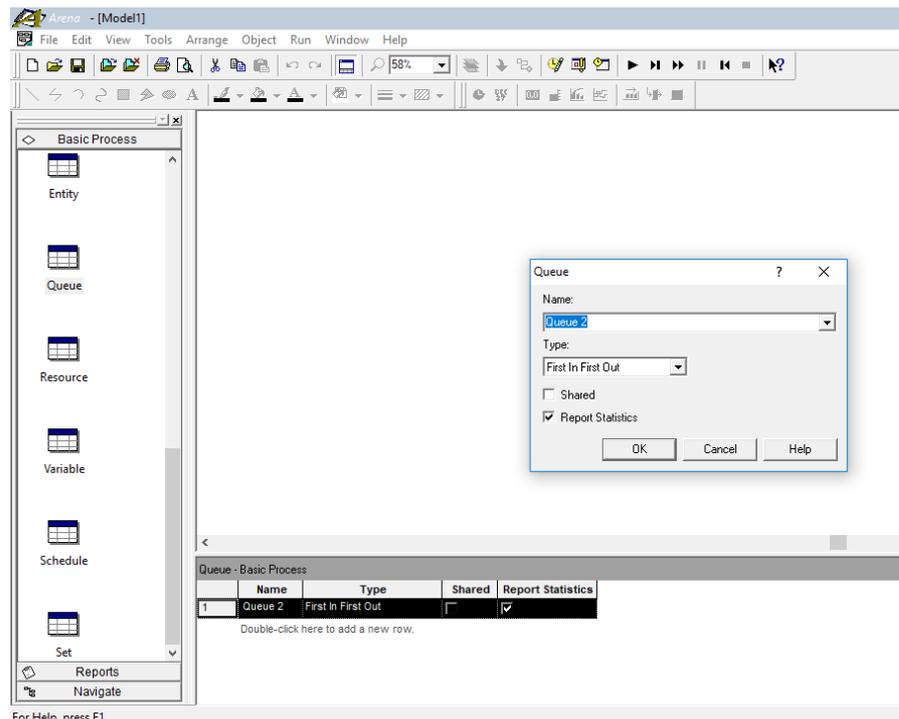


Ilustración 51.- Módulo queue

- **Variable:** Este módulo sirve para añadirle características a una variable, así como su valor o valores iniciales. Las variables del modelo, a diferencia de los datos, van cambiando su valor a lo largo de la simulación. Mediante diferentes herramientas (como por ejemplo Plot), se pueden representar los valores que toma la variable en cuestión a lo largo de la simulación.

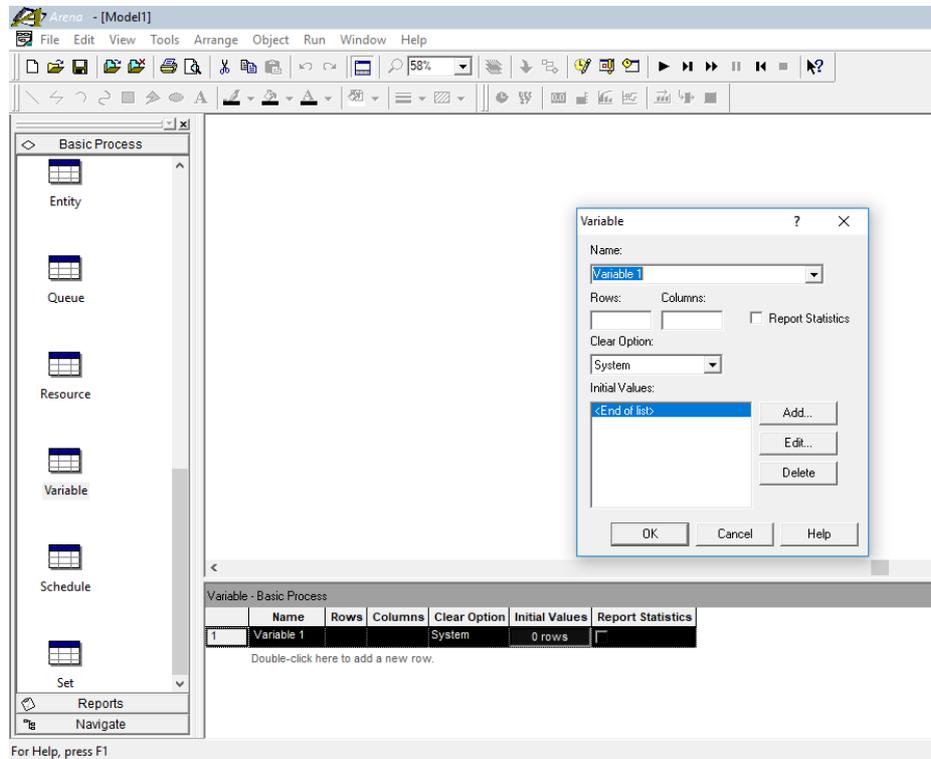


Ilustración 52.- Módulo variable

- **Schedule:** Este módulo permite definir la planificación de un recurso (si se combina con el módulo resource) o de una llegada (si se combina con el módulo create). Por ejemplo, se puede introducir el horario de los turnos de los operarios o los tiempos de encendido de las máquinas.

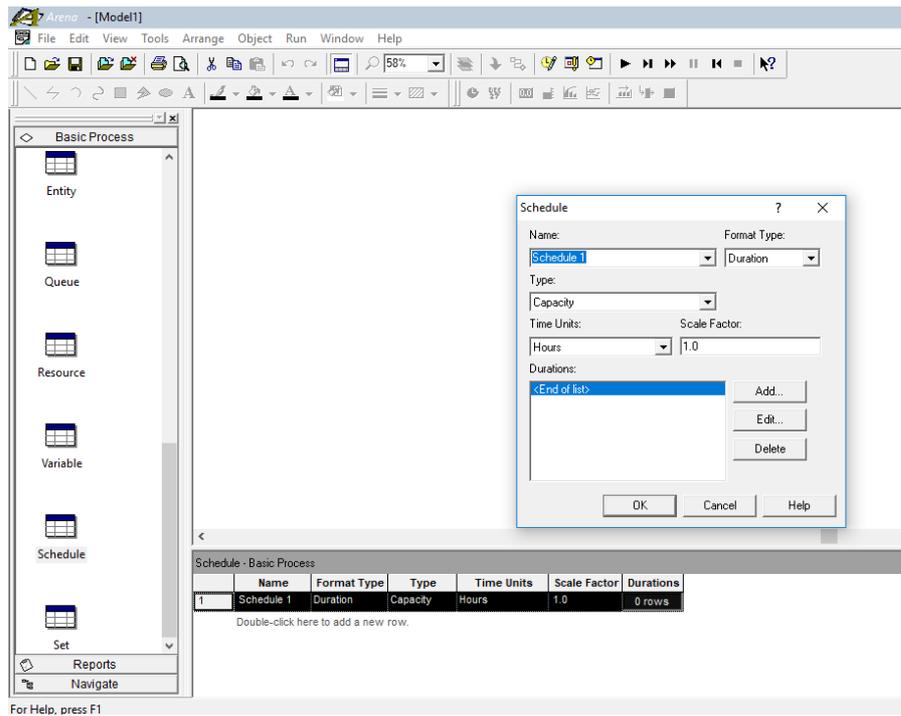


Ilustración 53.- Módulo schedule

- **Set:** El módulo Sets, agrupa diferentes entidades en conjuntos. Estas entidades pueden ser recursos, cuentas, tipos de entidad y figuras de entidad. Esto permitirá dar de alta esta información y utilizarla de una forma más fácil, práctica y visual.

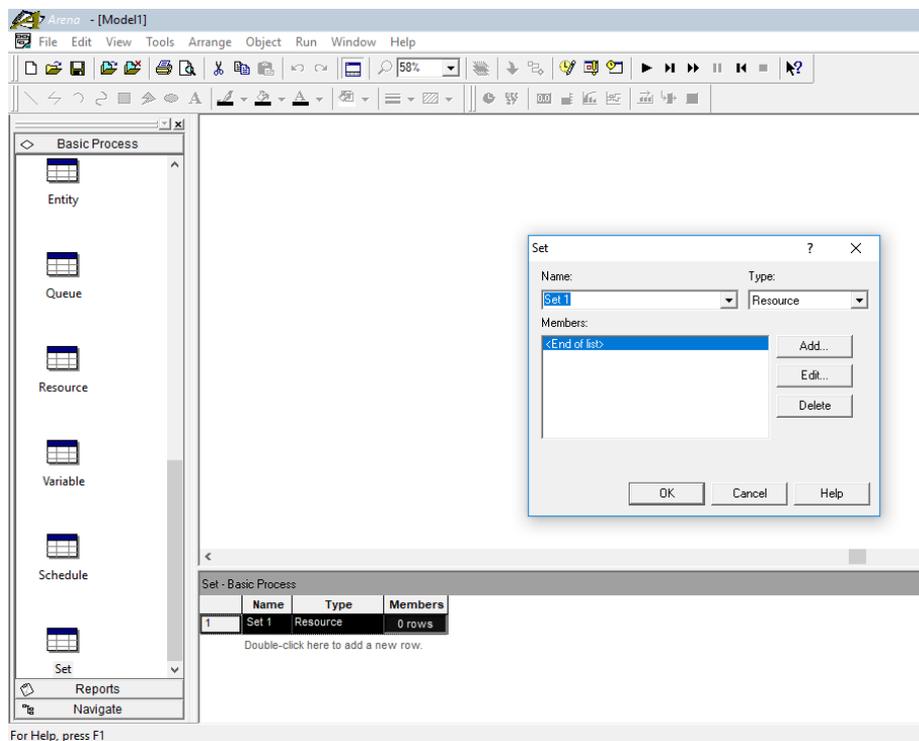


Ilustración 54.- Módulo sets

11.3 Métodos de formación de células

11.3.1 Matriz de incidencia

	Shoot peening						HP	Shoot peening						
	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)		Manual (PR09)	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)
S/0322	1				1		S/0876	1					1	
S/0323	1				1		S/0877	1					1	
S/0324	1				1		S/0878	1					1	
S/0325	1				1		S/0881	1					1	
S/0326	1				1		S/0884	1					1	
S/0328	1						S/0892	1					1	
S/0329					1		S/0895	1					1	
S/0332	1				1		S/0903	1					1	
S/0333	1				1		S/0905	1					1	
S/0336	1				1		S/0910	1					1	
S/0338	1				1		S/0919	1					1	
S/0344	1				1		S/0932	1					1	
S/0348	1				1		S/0958	1					1	
S/0349	1				1		S/0960						1	
S/0350	1				1		S/0961			1	1			
S/0352	1		1				S/0962			1				
S/0358					1		S/0964						1	1
S/0372	1				1		S/0975	1					1	
S/0377	1						S/0983			1				
S/0389	1				1		S/0987	1					1	
S/0390	1				1		S/0989			1				
S/0391	1				1		S/0990			1				
S/0398	1				1		S/0991			1				
S/0406	1				1		S/0992		1					
S/0410	1				1	1	S/0993	1					1	
S/0413	1				1		S/0994	1					1	
S/0416	1				1		S/0996	1					1	
S/0419							S/1003	1					1	
S/0427	1				1		S/1004	1					1	
S/0428	1				1		S/1007	1					1	
S/0429	1				1		S/1014	1					1	
S/0430	1				1		S/1022	1					1	
S/0432	1				1		S/1028			1				
S/0441	1				1		S/1032			1				
S/0442	1						S/1035						1	
S/0451	1				1		S/1048			1	1			
S/0469	1						S/1050	1					1	
S/0477				1			S/1051							
S/0506			1				S/1057	1					1	
S/0513	1						S/1059						1	
S/0519	1						S/1062	1					1	
S/0521	1						S/1063	1					1	
S/0525	1				1		S/1064	1					1	
S/0527	1				1		S/1065	1					1	

S/0530	1			1	S/1066						
S/0532	1			1	S/1067						
S/0533	1			1	S/1068	1					1
S/0564			1		S/1069	1					1
S/0575	1			1	S/1070						1
S/0595	1				S/1071	1					1
S/0597			1		S/1072				1		
S/0626			1		S/1075	1					1
S/0631			1		S/1079	1					1
S/0635			1		S/1082	1					
S/0638			1		S/1086	1					
S/0640			1		S/1094	1					1
S/0647	1			1	S/1095	1					1
S/0648	1			1	S/1096	1					1
S/0649	1			1	S/1097	1					1
S/0651			1		S/1102						1
S/0652			1		S/1106						1
S/0659			1		S/1107						1
S/0678	1			1	S/1114	1					
S/0684			1		S/1115	1					1
S/0686				1	S/1116	1					1
S/0687				1	S/1142			1			
S/0714	1			1	S/1149	1					1
S/0719	1			1	S/1150	1					1
S/0722				1	S/1156			1			
S/0725	1			1	S/1157						1
S/0740			1		S/1159	1					1
S/0746		1			S/1160	1					1
S/0748			1		S/1164				1		
S/0752		1			S/1165				1		
S/0753		1			S/1166				1		
S/0754		1			S/1179	1					1
S/0755			1		S/1180			1			
S/0756			1		S/1190			1			
S/0757			1		S/1191			1			
S/0758			1		S/1202			1			
S/0759			1		S/1211			1			
S/0760			1		S/1219			1			
S/0761			1		S/1237						
S/0762			1		S/1245	1					1
S/0763			1		S/1248	1					1
S/0764			1		S/1250	1					1
S/0765				1	S/1251						1
S/0777	1			1	S/1252	1					1
S/0778	1			1	S/1253	1					1
S/0781	1			1	S/1255			1			
S/0784	1			1	S/1258			1			
S/0785	1			1	S/1260						
S/0786	1			1	S/1261	1					1
S/0794	1			1	S/1263					1	

S/0795	1			1	S/1264			1		
S/0796	1			1	S/1265	1				
S/0798					1 S/1266					
S/0810	1			1	S/1267	1				1
S/0812	1			1	S/1268			1		
S/0831	1			1	S/1269			1		
S/0833	1			1	S/1270			1		
S/0835	1			1	S/1271					
S/0843			1		S/1272	1				1
S/0845	1			1	S/1273		1			
S/0855	1			1	S/1274	1				1
S/0874					S/1275	1				1
S/0875	1			1	S/1276	1				1

11.3.2 Resultado método ROC

	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)	Manual (PR09)	HP	Spar (PR01)	Carrusel (PR02)	613 (PR03)	ID (PR04)	Manual (PR06)	Manual (PR09)
S/0322	1				1			S/1179	1				1	
S/0323	1				1			S/1245	1				1	
S/0324	1				1			S/1248	1				1	
S/0325	1				1			S/1250	1				1	
S/0326	1				1			S/1252	1				1	
S/0332	1				1			S/1253	1				1	
S/0333	1				1			S/1261	1				1	
S/0336	1				1			S/1267	1				1	
S/0338	1				1			S/1272	1				1	
S/0344	1				1			S/1274	1				1	
S/0348	1				1			S/1275	1				1	
S/0349	1				1			S/1276	1				1	
S/0350	1				1			S/0329					1	
S/0372	1				1			S/0358					1	
S/0389	1				1			S/0686					1	
S/0390	1				1			S/0687					1	
S/0391	1				1			S/0722					1	
S/0398	1				1			S/0960					1	
S/0406	1				1			S/0964					1	
S/0410	1				1			S/1035					1	
S/0413	1				1			S/1059					1	
S/0416	1				1			S/1070					1	
S/0427	1				1			S/1102					1	
S/0428	1				1			S/1106					1	
S/0429	1				1			S/1107					1	
S/0430	1				1			S/1157					1	
S/0432	1				1			S/1251					1	
S/0441	1				1			S/0961		1	1			
S/0451	1				1			S/1048		1	1			
S/0525	1				1			S/0477			1			
S/0527	1				1			S/0765			1			
S/0530	1				1			S/0843			1			
S/0532	1				1			S/1263			1			
S/0533	1				1			S/0352	1	1				
S/0575	1				1			S/0506		1				
S/0647	1				1			S/0564		1				
S/0648	1				1			S/0597		1				
S/0649	1				1			S/0626		1				
S/0678	1				1			S/0631		1				
S/0714	1				1			S/0635		1				
S/0719	1				1			S/0638		1				
S/0725	1				1			S/0640		1				
S/0777	1				1			S/0651		1				
S/0778	1				1			S/0652		1				
S/0781	1				1			S/0659		1				
S/0784	1				1			S/0684		1				

S/0785	1			1	S/0740		1		
S/0786	1			1	S/0748		1		
S/0794	1			1	S/0755		1		
S/0795	1			1	S/0756		1		
S/0796	1			1	S/0757		1		
S/0810	1			1	S/0758		1		
S/0812	1			1	S/0759		1		
S/0831	1			1	S/0760		1		
S/0833	1			1	S/0761		1		
S/0835	1			1	S/0762		1		
S/0845	1			1	S/0763		1		
S/0855	1			1	S/0764		1		
S/0875	1			1	S/0962		1		
S/0876	1			1	S/0983		1		
S/0877	1			1	S/0989		1		
S/0878	1			1	S/0990		1		
S/0881	1			1	S/0991		1		
S/0884	1			1	S/1028		1		
S/0892	1			1	S/1032		1		
S/0895	1			1	S/1072		1		
S/0903	1			1	S/1164		1		
S/0905	1			1	S/1165		1		
S/0910	1			1	S/1166		1		
S/0919	1			1	S/1264		1		
S/0932	1			1	S/1268		1		
S/0958	1			1	S/1269		1		
S/0975	1			1	S/1270		1		
S/0987	1			1	S/0746		1		
S/0993	1			1	S/0752		1		
S/0994	1			1	S/0753		1		
S/0996	1			1	S/0754		1		
S/1003	1			1	S/0992		1		
S/1004	1			1	S/1142		1		
S/1007	1			1	S/1156		1		
S/1014	1			1	S/1180		1		
S/1022	1			1	S/1190		1		
S/1050	1			1	S/1191		1		
S/1057	1			1	S/1202		1		
S/1062	1			1	S/1211		1		
S/1063	1			1	S/1219		1		
S/1064	1			1	S/1255		1		
S/1065	1			1	S/1258		1		
S/1068	1			1	S/1273		1		
S/1069	1			1	S/0328	1			
S/1071	1			1	S/0377	1			
S/1075	1			1	S/0442	1			
S/1079	1			1	S/0469	1			
S/1094	1			1	S/0513	1			
S/1095	1			1	S/0519	1			
S/1096	1			1	S/0521	1			

S/1097	1				1	S/0595	1					
S/1115	1				1	S/1082	1					
S/1116	1				1	S/1086	1					
S/1149	1				1	S/1114	1					
S/1150	1				1	S/1265	1					
S/1159	1				1	S/0798						1
S/1160	1				1	S/0964						1

11.3.3 Resultado método DCA

	HP	Spar (PR01)	Manual (PR06)	613 (PR03)	ID (PR04)	Carrusel (PR02)	Manual (PR09)	HP	Spar (PR01)	Manual (PR06)	613 (PR03)	ID (PR04)	Carrusel (PR02)	Manual (PR09)
S/0410	1	1					1	S/1116	1	1				
S/0322	1	1						S/1149	1	1				
S/0323	1	1						S/1150	1	1				
S/0324	1	1						S/1159	1	1				
S/0325	1	1						S/1160	1	1				
S/0326	1	1						S/1179	1	1				
S/0332	1	1						S/1245	1	1				
S/0333	1	1						S/1248	1	1				
S/0336	1	1						S/1250	1	1				
S/0338	1	1						S/1252	1	1				
S/0344	1	1						S/1253	1	1				
S/0348	1	1						S/1261	1	1				
S/0349	1	1						S/1267	1	1				
S/0350	1	1						S/1272	1	1				
S/0352	1		1					S/1274	1	1				
S/0372	1	1						S/1275	1	1				
S/0389	1	1						S/1276	1	1				
S/0390	1	1						S/0328	1					
S/0391	1	1						S/0329		1				
S/0398	1	1						S/0358		1				
S/0406	1	1						S/0377	1					
S/0413	1	1						S/0442	1					
S/0416	1	1						S/0469	1					
S/0427	1	1						S/0477				1		
S/0428	1	1						S/0506			1			
S/0429	1	1						S/0513	1					
S/0430	1	1						S/0519	1					
S/0432	1	1						S/0521	1					
S/0441	1	1						S/0564			1			
S/0451	1	1						S/0595	1					
S/0525	1	1						S/0597			1			
S/0527	1	1						S/0626			1			
S/0530	1	1						S/0631			1			
S/0532	1	1						S/0635			1			
S/0533	1	1						S/0638			1			
S/0575	1	1						S/0640			1			
S/0647	1	1						S/0651			1			
S/0648	1	1						S/0652			1			
S/0649	1	1						S/0659			1			
S/0678	1	1						S/0684			1			
S/0714	1	1						S/0686		1				
S/0719	1	1						S/0687		1				
S/0725	1	1						S/0722		1				
S/0777	1	1						S/0740			1			
S/0778	1	1						S/0746				1		
S/0781	1	1						S/0748			1			

S/0784	1	1				S/0752				1		
S/0785	1	1				S/0753				1		
S/0786	1	1				S/0754				1		
S/0794	1	1				S/0755			1			
S/0795	1	1				S/0756			1			
S/0796	1	1				S/0757			1			
S/0810	1	1				S/0758			1			
S/0812	1	1				S/0759			1			
S/0831	1	1				S/0760			1			
S/0833	1	1				S/0761			1			
S/0835	1	1				S/0762			1			
S/0845	1	1				S/0763			1			
S/0855	1	1				S/0764			1			
S/0875	1	1				S/0765					1	
S/0876	1	1				S/0798						1
S/0877	1	1				S/0843					1	
S/0878	1	1				S/0960		1				
S/0881	1	1				S/0962			1			
S/0884	1	1				S/0983			1			
S/0892	1	1				S/0989			1			
S/0895	1	1				S/0990			1			
S/0903	1	1				S/0991			1			
S/0905	1	1				S/0992				1		
S/0910	1	1				S/1028			1			
S/0919	1	1				S/1032			1			
S/0932	1	1				S/1035		1				
S/0958	1	1				S/1059		1				
S/0961			1		1	S/1070		1				
S/0964			1		1	S/1072			1			
S/0975	1	1				S/1082	1					
S/0987	1	1				S/1086	1					
S/0993	1	1				S/1102		1				
S/0994	1	1				S/1106		1				
S/0996	1	1				S/1107		1				
S/1003	1	1				S/1114	1					
S/1004	1	1				S/1142				1		
S/1007	1	1				S/1156				1		
S/1014	1	1				S/1157		1				
S/1022	1	1				S/1164			1			
S/1048			1		1	S/1165			1			
S/1050	1	1				S/1166			1			
S/1057	1	1				S/1180				1		
S/1062	1	1				S/1190				1		
S/1063	1	1				S/1191				1		
S/1064	1	1				S/1202				1		
S/1065	1	1				S/1211				1		
S/1068	1	1				S/1219				1		
S/1069	1	1				S/1251		1				
S/1071	1	1				S/1255				1		
S/1075	1	1				S/1258				1		

S/1079	1	1				S/1263				1
S/1094	1	1				S/1264			1	
S/1095	1	1				S/1265	1			
S/1096	1	1				S/1268			1	
S/1097	1	1				S/1269			1	
S/1115	1	1				S/1270			1	
						S/1273			1	

11.3.4 Matriz inicial coeficientes de similitud

	Spar	Carrusel	630	ID	Manual06	Manual09
Spar		0	0,00591716	0	0,8041958	0,007692308
Carrusel			0	0	0	0
630				0,043478261	0	0
ID					0	0
Manual06						0,015267176
Manual09						

11.3.4.1 Resultados iteraciones método SLCA

1ª Iteración

	Carrusel	630	ID	Manual09
Spar, Manual06	0	0,00591716	0	0,015267176
Carrusel		0	0	0
630			0,04347826	0
ID				0
Manual09				

2ª Iteración

	Carrusel	630, ID	Manual09
Spar, manual06	0	0,00591716	0,015267176
carrusel		0	0
630, ID			0

3ª Iteración

	Carrusel	630, ID
spar, manual06, manual09	0	0,00591716
carrusel		0

11.3.4.2 Resultados iteraciones modelo CLCA

1ª Iteración

	carrusel	630	ID	m09
Spar,m06	0	0	0	0,007692308
Carrusel		0	0	0
630			0,04347826	0
ID				0
m09				

2ª Iteración

	Carrusel	630,ID	Manual09
Spar,manual06	0	0	0,00769231
carrusel		0	0
630, ID			0

3ª Iteración

	Carrusel	630, ID
spar,manual06,manual09	0	0
carrusel		0

11.3.4.3 Resultados iteraciones modelo ALCA

1ª Iteración

	Carrusel	630	ID	Manual09
Spar, Manual06	0	0,00295858	0	0,003846154
Carrusel		0	0	0
630			0,04347826	0
ID				0
Manual09				

2ª Iteración

	Carrusel	630,ID	Manual09
Spar,manual06	0	0,00147929	0,00384615
carrusel		0	0
630, ID			0

3ª Iteración

	Carrusel	630, ID
spar,manual06,manual09	0	0,00073964
carrusel		0