

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis, modelado y optimización de sistemas de
producción Seru Seisan según coste y sostenibilidad

Autor: Beatriz Fernández Jiménez

Tutor: Dr. Ignacio Eguía Salinas

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis, modelado y optimización de sistemas de producción Seru Seisan según coste y sostenibilidad

Autor:

Beatriz Fernández Jiménez

Tutor:

Dr. Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Máster: Análisis, modelado y optimización de sistemas de producción Seru Seisan según coste y sostenibilidad

Autor: Beatriz Fernández Jiménez

Tutor: Dr. Ignacio Eguía Salinas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

RESUMEN

Seru Seisan es una tipología de sistema de producción en el que las tareas que se llevan a cabo para la obtención de un determinado producto son agrupadas en serus, término japonés que significa célula. Las labores realizadas en cada seru pueden ser tanto de fabricación como de montaje a partir de piezas ya fabricadas previamente y que son tomadas como material de partida en el seru. Lo habitual en los sistemas de producción Seru Seisan es que un seru únicamente sea empleado para obtener un tipo de producto.

En el presente proyecto se ha llevado a cabo un estudio de estos sistemas de producción, enfocando el análisis realizado desde el punto de vista de la integración del concepto de sostenibilidad. Con ello, se pretende llevar a cabo la configuración de un sistema de producción Seru Seisan mediante diversos modelos con diferentes objetivos y requisitos, pero siempre manteniendo la intención de plasmar en todos ellos la importancia de desarrollar soluciones sostenibles para el medio ambiente.

En primer lugar, se plantea el tiempo total de producción, con el consecuente gasto energético, como la variable que se desea minimizar. Tras ello, se propone disminuir lo máximo posible las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Por último, se introduce el concepto del coste total como objetivo a reducir, pero incorporando en la definición del modelo los requisitos referentes a las condiciones deseadas de sostenibilidad.

Los resultados arrojados por la optimización de los modelos planteados en este proyecto responden a las cuestiones relativas a qué serus deben emplearse en la elaboración de cada tipo de producto, qué cantidad de la demanda a cumplir de dicho producto debe ser asociada a cada uno de los serus seleccionados y qué trabajadores deben ser asignados a realizar las tareas correspondientes a la fabricación de cada producto en cada seru.

Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad ante pequeñas variaciones de determinados parámetros que mostrarán cómo se comportan las soluciones en dichos casos y cuál es la situación resultante respecto a las emisiones que se produce. También se añade un estudio sobre las diferentes tipologías de costes y su relación con los niveles de emisión de CO₂, tras lo cual se enumeran las conclusiones finales que se obtienen tras la realización de este trabajo.

Resumen	vii
Índice	ix
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	17
1.1 <i>Antecedentes al trabajo</i>	17
1.2 <i>Objetivos del trabajo</i>	18
1.3 <i>Estructura del trabajo</i>	19
2 Sistemas de producción Seru Seisan	21
2.1 <i>Antecedentes a Seru Seisan</i>	21
2.2 <i>Contexto y origen de Seru Seisan</i>	21
2.2.1 <i>Líneas automáticas</i>	22
2.2.2 <i>Alta variabilidad de la demanda</i>	23
2.2.3 <i>Volumen de demanda</i>	23
2.2.4 <i>Incremento de la competencia en el mercado</i>	23
2.2.5 <i>Aparición del Sistema de producción Seru Seisan en Japón</i>	24
2.3 <i>Características de Seru Seisan</i>	24
2.4 <i>Tipologías de Seru Seisan</i>	26
2.4.1 <i>Divisional</i>	26
2.4.2 <i>Rotativo</i>	27
2.4.3 <i>Yatai</i>	28
2.5 <i>Ventajas e inconvenientes de Seru Seisan</i>	29
2.5.1 <i>Ventajas</i>	29
2.5.1.1 <i>Flexibilidad</i>	29
2.5.1.2 <i>Makespan</i>	29
2.5.1.3 <i>Inventario</i>	30
2.5.1.4 <i>Reducción del impacto de fallos</i>	30
2.5.1.5 <i>Bajo coste</i>	30
2.5.1.6 <i>Enriquecimiento de trabajadores</i>	30
2.5.1.7 <i>Sensación de equipo</i>	30
2.5.2 <i>Inconvenientes</i>	31
2.5.2.1 <i>Volumen de demanda alto</i>	31
2.5.2.2 <i>Costes de entrenamiento</i>	31
2.5.2.3 <i>Aumento de responsabilidad en los trabajadores</i>	31
2.5.2.4 <i>Rechazo de los trabajadores a la formación continua</i>	32
2.5.2.5 <i>Posible reducción de personal</i>	32
2.6 <i>Sostenibilidad</i>	32
2.6.1 <i>Sostenibilidad en el medio ambiente (ENP)</i>	33
2.6.2 <i>Sostenibilidad económica (ECP)</i>	34
2.6.3 <i>Sostenibilidad social (SOP)</i>	35
2.7 <i>Técnicas de resolución para la reconfiguración Seru Seisan</i>	36
2.7.1 <i>Tácticas para la implementación de Seru Seisan</i>	37
2.7.1.1 <i>Trabajadores con habilidades transversales (MWA)</i>	37
2.7.1.2 <i>Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)</i>	37
2.7.1.3 <i>Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)</i>	37
2.7.1.4 <i>Filosofía de mejora continua (COI)</i>	37
2.7.1.5 <i>Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)</i>	38
2.7.1.6 <i>Estudio de la distribución (layout) óptimo para Seru Seisan (SLS)</i>	38

2.7.1.7	Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	38
2.7.2	Descripción de técnicas desarrolladas en el panorama actual	38
2.7.2.1	Análisis teórico	39
2.7.2.2	Análisis empírico	44
2.7.2.3	Modelo matemático	47
2.7.2.4	Simulaciones	52
3	Problema de optimización de producción Seru sostenible	55
3.1	Objetivo	55
3.2	Planteamiento	55
3.3	Datos de partida del modelo básico	57
3.3.1	Caso de prueba	57
3.3.2	Caso real	59
3.4	Hipótesis de partida	60
3.5	Variables implicadas	61
3.6	Modelo matemático original	63
3.7	Linealización	65
4	Problema de optimización ampliado – Inclusión de coste total	69
4.1	Objetivo	69
4.2	Planteamiento	69
4.3	Datos de partida del modelo ampliado	72
4.3.1	Caso de prueba	72
4.3.2	Caso real	75
4.4	Hipótesis de partida	79
4.5	Variables implicadas	81
4.6	Modelo matemático	83
5	Experimentación	87
5.1	Metodología de resolución – Lenguaje Python	87
5.2	Escenarios	87
5.3	Resultados	88
5.3.1	Modelo original linealizado	89
5.3.1.1	Caso de prueba	89
5.3.1.1.1	Minimización <i>makespan</i>	89
5.3.1.1.2	Minimización de emisiones de CO ₂	91
5.3.1.1.3	Comparativa modelo original con algoritmo genético vs modelo linealizado	92
5.3.1.2	Caso real	94
5.3.1.2.1	Minimización <i>makespan</i>	94
5.3.1.2.2	Minimización de emisiones de CO ₂	96
5.3.1.2.3	Comparativa modelo original con algoritmo genético vs modelo linealizado	98
5.3.2	Modelo ampliado	99
5.3.2.1	Caso prueba	100
5.3.2.2	Caso real	102
5.3.2.2.1	Frontera de Pareto: Emisiones CO ₂ vs Coste total	105
5.3.2.2.2	Análisis de sensibilidad de costes	106
5.3.2.2.2.1	Coste de entrenamiento	107
5.3.2.2.2.2	Coste de consumo de energía	108
5.3.2.2.2.3	Coste de instalación	109
5.3.2.2.2.4	Coste de set-up	111
5.3.2.2.3	Análisis de la distribución de tipos de costes	112
6	Conclusiones	115
7	Líneas futuras de investigación	117
8	Anexos	119

8.1	<i>Código Python modelo original linealizado</i>	119
8.2	<i>Código Python modelo ampliado</i>	124
9	Referencias	133

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [24].</i>	39
<i>Tabla 2. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [25].</i>	40
<i>Tabla 3. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [26].</i>	41
<i>Tabla 4. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [4].</i>	42
<i>Tabla 5. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [27].</i>	42
<i>Tabla 6. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [18].</i>	43
<i>Tabla 7. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [13].</i>	44
<i>Tabla 8. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [28].</i>	45
<i>Tabla 9. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [29].</i>	46
<i>Tabla 10. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [30].</i>	46
<i>Tabla 11. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [31].</i>	47
<i>Tabla 12. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [32].</i>	48
<i>Tabla 13. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [33].</i>	48
<i>Tabla 14. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [20].</i>	49
<i>Tabla 15. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [14].</i>	50
<i>Tabla 16. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [2].</i>	51
<i>Tabla 17. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [3].</i>	52
<i>Tabla 18. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [34].</i>	52
<i>Tabla 19. Datos iniciales – Modelo básico – Caso de prueba [3].</i>	57
<i>Tabla 20. Serus seleccionables, demanda y límite CO₂ – Modelo básico – Caso de prueba [3].</i>	58
<i>Tabla 21. Tiempo de procesado (h) – Modelo básico – Caso de prueba [3].</i>	58
<i>Tabla 22. Consumo de energía (kWh) – Modelo básico – Caso de prueba [3].</i>	59
<i>Tabla 23. Datos iniciales – Modelo básico – Caso real [3].</i>	59
<i>Tabla 24. Serus seleccionables, demanda y límite CO₂ – Modelo básico – Caso real [3].</i>	59
<i>Tabla 25. Tiempo de procesado (h) – Modelo básico – Caso real [3].</i>	60
<i>Tabla 26. Consumo de energía (kWh) – Modelo básico – Caso real [3].</i>	60
<i>Tabla 27. Datos iniciales – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	72
<i>Tabla 28. Serus seleccionables, demanda, límite CO₂ y de makespan – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	73
<i>Tabla 29. Tiempo de procesado (h) – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	73
<i>Tabla 30. Consumo de energía (kWh) – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	74
<i>Tabla 31. Costes de entrenamiento – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	74
<i>Tabla 32. Costes de set-up – Modelo ampliado – Caso de prueba.</i>	75
<i>Tabla 33. Datos iniciales – Modelo ampliado – Caso real.</i>	75
<i>Tabla 34. Serus seleccionables, demanda, límite CO₂ y de makespan – Modelo ampliado – Caso real.</i>	76
<i>Tabla 35. Tiempo de procesado (h) – Modelo ampliado – Caso real.</i>	76
<i>Tabla 36. Consumo de energía (kWh) – Modelo ampliado – Caso real.</i>	76

<i>Tabla 37. Costes de entrenamiento – Modelo ampliado – Caso real.</i>	79
<i>Tabla 38. Costes de set-up – Modelo ampliado – Caso real.</i>	79
<i>Tabla 39. Uds de producto – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.</i>	89
<i>Tabla 40. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.</i>	90
<i>Tabla 41. Uds de producto – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.</i>	91
<i>Tabla 42. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.</i>	91
<i>Tabla 43. Resultados del algoritmo genético frente al modelo linealizado – Caso de prueba.</i>	93
<i>Tabla 44. Uds de producto – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.</i>	94
<i>Tabla 45. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.</i>	95
<i>Tabla 46. Uds de producto – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.</i>	96
<i>Tabla 47. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.</i>	97
<i>Tabla 48. Resultados del algoritmo genético frente al modelo linealizado – Caso real.</i>	98
<i>Tabla 49. Uds de producto – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.</i>	100
<i>Tabla 50. Tiempo máximo y emisiones – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.</i>	100
<i>Tabla 51. Distribución de trabajadores – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.</i>	101
<i>Tabla 52. Uds de producto – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.</i>	103
<i>Tabla 53. Tiempo máximo y emisiones – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.</i>	103
<i>Tabla 54. Distribución de trabajadores – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.</i>	104

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Reconfiguración de línea de montaje tradicional en líneas de menor tamaño [4].</i>	22
<i>Figura 2. Seru divisional [18].</i>	27
<i>Figura 3. Seru rotativo [18].</i>	27
<i>Figura 4. Yatai [4].</i>	28
<i>Figura 5. Esquema de funcionamiento de la configuración considerada en el estudio – Modelo básico.</i>	56
<i>Figura 6. Esquema de funcionamiento de la configuración considerada en el estudio – Modelo ampliado.</i>	71
<i>Figura 7. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.</i>	90
<i>Figura 8. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.</i>	92
<i>Figura 9. Comparativa gráfica del algoritmo genético frente al modelo linealizado - Caso de prueba.</i>	93
<i>Figura 10. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.</i>	95
<i>Figura 11. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.</i>	97
<i>Figura 12. Comparativa gráfica del algoritmo genético frente al modelo linealizado - Caso real.</i>	99
<i>Figura 13. Distribución de productos por serus – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.</i>	102
<i>Figura 14. Distribución de productos por serus – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.</i>	104
<i>Figura 15. Frontera de Pareto: Emisiones CO₂ frente a coste total.</i>	105
<i>Figura 16. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de entrenamiento.</i>	107
<i>Figura 17. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de la energía.</i>	108
<i>Figura 18. Análisis de sensibilidad – Variación de los costes de instalación.</i>	110
<i>Figura 19. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de set-up.</i>	111
<i>Figura 20. Reparto de tipos de costes.</i>	112

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta sección de introducción es poner en contexto el presente proyecto sobre la configuración de sistemas de producción Seru Seisan dentro del marco global de su aplicación. Del mismo modo, se pretende ofrecer una visión genérica de los contenidos que se van a desarrollar en cada uno de los apartados que componen el proyecto.

1.1 Antecedentes al trabajo

Actualmente, Seru Seisan es un sistema de producción ampliamente conocido en Japón, tanto en el mundo académico como en el profesional. Numerosas empresas japonesas funcionan siguiendo las directrices que la filosofía Seru Seisan establece para incrementar el rendimiento de la gestión de la producción en sus plantas.

Ejemplos de empresas que han modificado su sistema de producción a uno de tipo Seru Seisan son Canon, Fujitsu y Sony, cuya aplicación ha sido exitosa y les ha ayudado a gestionar los requisitos impuestos por la demanda de sus productos de una forma más eficiente y beneficiosa que otros sistemas de producción tradicionales.

Sin embargo, fuera de Japón, Seru Seisan continúa siendo una técnica de organización de la producción prácticamente desconocida, y esto se debe en gran parte a la escasez de información relativa a Seru Seisan que hay disponible, ya que la gran mayoría de la misma se encuentra escrita en japonés, lo que supone un gran impedimento en su expansión internacional.

Con motivo de proporcionar una solución a este problema y favorecer la divulgación de las numerosas ventajas ofrecidas por la producción Seru Seisan fuera de Japón, surge el trabajo realizado por Luis de Lara Prats en 2017 [1], en el que, tomando como partida los planteamientos de la propuesta de Liu et al de 2013 [2], se ofrece una recopilación de los artículos científicos más relevantes en el panorama de la investigación y se lleva a cabo un minucioso estudio de los diferentes enfoques y metodologías que pueden ser empleados a la hora de reconfigurar un sistema de producción convencional a uno formado por serus.

Tomando como base de partida la información que nos ha proporcionado su trabajo, en el presente proyecto se plantea la incorporación del concepto de sostenibilidad al modelado y optimización de los sistemas de producción Seru Seisan, dando una gran relevancia a los conceptos asociados al consumo de energía, así como a las emisiones de CO₂ a la atmósfera que están vinculadas con los procesos de producción de las plantas industriales.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo es acoplar los aspectos relacionados con la sostenibilidad y la reducción del impacto medioambiental al proceso de reconfiguración de una planta industrial tradicional a una de tipología Seru Seisan.

Tras realizarse una descripción de los aspectos generales asociados a la producción Seru Seisan, en la que se describe de manera detallada el proceso que conllevó a la aparición de este sistema y sus principales características, se presenta el modelo matemático planteado por Liu et al [3] para obtener la solución óptima en el problema de organizar la producción de unos determinados niveles de demanda de productos con unos recursos específicos para conseguirlo aplicando la filosofía Seru Seisan enfocada desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Esto se hace marcando dos objetivos principales que se detallan a continuación:

- Disminución del tiempo total de fabricación.
- Disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera relacionadas con los procesos productivos.

Posteriormente, se analizan simplificaciones de este modelo mediante linealización y eliminación de restricciones redundantes que permiten obtener diferentes resultados a los proporcionados por el modelado original, lo que permite realizar una comparativa y obtener conclusiones acerca de la idoneidad de llevar a cabo dicha reducción en la complejidad del modelo.

Tras este estudio, se realiza la incorporación de los costes de producción como variable crucial del problema. El objetivo de esta parte es desarrollar un modelo matemático totalmente nuevo en el que los conceptos relacionados con la sostenibilidad se imponen mediante restricciones, mientras que en la optimización del modelo se busca siempre la reducción del coste total asociado a la producción de todos los elementos de la demanda. Esta vez se trata de un modelo con una única función objetivo, por lo que, en este nuevo enfoque, se añaden conceptos tales como la necesidad de proporcionar formación a los empleados destinados a cada una de las tareas que van a realizar en el nuevo sistema de producción resultante.

Una vez obtenidas las soluciones, otro de los objetivos de este proyecto es llevar a cabo un análisis de sensibilidad de parámetros en el que se puede averiguar cómo afectan pequeñas variaciones aplicadas a los diferentes tipos de costes tanto en las emisiones de dióxido de carbono resultantes como en el coste total de producción. Este análisis permite ver cuál sería la situación ante cambios externos del entorno, como

puede ser un incremento del coste de la electricidad, un aumento en los alquileres del local para las instalaciones o de los equipos, etc.

Finalmente, se realiza un estudio cuyo objetivo es analizar el porcentaje de coste total que cada uno de los gastos asociados a la producción representa, así como ver su evolución cuando los límites de CO₂ emitido permitidos se modifican, ya sea por cambios en las regulaciones pertinentes o bien por modificaciones en la propia política de empresa al respecto.

1.3 Estructura del trabajo

A continuación, se detalla la estructura que sigue el trabajo, con una breve descripción de cada uno de los apartados que lo componen:

1. **Introducción.** Se describe la situación previa a la realización del trabajo, así como los objetivos que se persiguen con el mismo y la estructura en que se organiza el contenido desarrollado.
2. **Sistemas de producción Seru Seisan.** Se ofrece una descripción general de los sistemas de producción Seru Seisan, detallando los antecedentes y el contexto en el que tuvo lugar su aparición, así como los motivos principales que propiciaron el cambio de paradigma que supone su implementación como sustitución de los sistemas de producción tradicionales. Se enumeran las principales características de los serus, así como los distintos tipos de serus que se pueden emplear. Finalmente, se analizan las ventajas e inconvenientes de este sistema de producción, dando paso a un análisis sobre las grandes posibilidades que aporta para la consecución de una producción sostenible.
3. **Sistemas de producción Seru Seisan.** Se ofrece una descripción general de los sistemas de producción Seru Seisan, detallando los antecedentes y el contexto en el que tuvo lugar su aparición, así como los motivos principales que propiciaron el cambio de paradigma que supone su implementación como sustitución de los sistemas de producción tradicionales. Se enumeran las principales características de los serus, así como los distintos tipos de serus que se pueden emplear. Finalmente, se analizan las ventajas e inconvenientes de este sistema de producción, dando paso a un análisis sobre las grandes posibilidades que aporta para la consecución de una producción sostenible.
4. **Problema de optimización de producción Seru Seisan.** En este apartado se plantea el problema de reconfiguración de un sistema de producción tradicional a uno basado en serus, para lo que se especifican los objetivos que se pretenden alcanzar, los datos e hipótesis de partida asumidos como ciertos para su modelado matemático, así como dicho modelo con una descripción detallada de las ecuaciones y variables implicadas en el mismo. Finalmente, se lleva a cabo la linealización y simplificación justificada del modelo original.

5. **Problema de optimización ampliado – Inclusión de costes.** Se plantea un modelo matemático completamente nuevo a partir del cual se incluyen los costes totales de producción, de manera que el nuevo objetivo pasa a ser la reducción de los mismos, pero visto desde el punto de vista de la sostenibilidad. Nuevamente, se detallan los objetivos, datos e hipótesis empleados, así como se describen cada una de las variables que forman parte del modelo y el significado de todas las ecuaciones planteadas.
6. **Experimentación.** En este apartado se detalla la metodología de resolución empleada en la optimización de los modelos planteados. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, en primer lugar, para el caso del modelo linealizado que se obtuvo en el apartado 3. Estos resultados se comparan con los presentados en el artículo de Liu et al [3], con respecto al cual se realiza un estudio comparativo. Posteriormente, se presentan los resultados asociados a la aplicación del modelo ampliado en el que se incluyeron los costes totales como variable crucial del problema a resolver. A partir de dichos resultados, y tras extraer todas las conclusiones que los mismos nos aportan, se procede a realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros que forman parte del modelo, determinando el efecto producido por pequeñas variaciones en diferentes datos de partida. Finalmente, se continúa el análisis profundizando en las distribuciones de los tipos de costes en diferentes situaciones, estudiándose cómo se relacionan los mismos con las emisiones de dióxido de carbono.
7. **Conclusiones.** Se recopilan las principales conclusiones que se han obtenido tras la realización del trabajo, presentándose en el orden correspondiente al que sigue la estructura del trabajo con el objetivo de proporcionar al lector claridad, así como referencias a los apartados en los que cada una de las conclusiones fueron obtenidas.
8. **Líneas futuras de investigación.** Se presentan las actuales líneas de investigación que permanecen abiertas, y por tanto disponibles para continuar ahondando en el mundo de los sistemas de producción Seru Seisan.
9. **Anexos.** Se adjuntan los códigos en lenguaje Python implementados para la resolución de los modelos matemáticos expuestos anteriormente.
10. **Referencias.** Se trata de un recopilatorio de todos los trabajos previos, artículos de investigación y literatura variada que han sido consultados para la elaboración del presente trabajo.

2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN SERU SEISAN

En este apartado se va a llevar a cabo una descripción de los sistemas de producción Seru Seisan, exponiéndose la situación que dio lugar a la aparición de los mismos y detallándose los principales motivos que propiciaron su consolidación como un sistema de producción eficiente e idóneo ante determinados tipos de demanda.

Se describirán las principales características de los sistemas Seru Seisan, las tipologías de serus que existen a día de hoy y las ventajas e inconvenientes que presenta su aplicación a los sistemas productivos.

Por último, se analizará el concepto de sostenibilidad aplicado en la producción Seru Seisan, estudiándose los efectos positivos que tiene sobre la misma y los aspectos con respecto a los cuales Seru Seisan ejerce un mayor impacto.

2.1 Antecedentes a Seru Seisan

Previo a la aparición de los sistemas Seru Seisan, la gestión de la producción predominante en el panorama empresarial se basaba en la incorporación de las líneas de transporte a los procesos de fabricación. Avaladas por los excelentes resultados que produjeron las líneas de transporte en el incremento del rendimiento económico tras su aparición, el planteamiento de los sistemas de producción buscaba por defecto la manera de hacer partícipes a las líneas de transporte en sus procesos de fabricación y montaje.

Sin embargo, mientras en occidente se consolidaba la fijación en las líneas de transporte, en Japón surgía un nuevo planteamiento de la producción que superaba las prestaciones de las líneas de transporte en determinados aspectos y que aumentaba el rendimiento económico cuando era empleado para satisfacer ciertos tipos específicos de demanda: Seru Seisan.

Esto llevó a empresas como Canon, Fujitsu o Sony a reconfigurar sus plantas de producción, pasando del empleo de las ya para entonces tradicionales líneas de transporte a sistemas Seru Seisan. A raíz de su implementación en empresas de semejante calibre, Seru Seisan comenzó a despertar interés en occidente, principalmente en el mundo académico [4].

2.2 Contexto y origen de Seru Seisan

Los primeros indicios de reconfiguración de las tradicionales líneas de montaje a sistemas que se aproximaban a la filosofía Seru Seisan consistieron en la división de las habituales cintas transportadoras en pequeñas líneas especializadas.

Así, como se muestra en la *Figura 1*, la línea principal recibía como *inputs* los materiales y elementos requeridos para la elaboración de cada uno de los productos demandados. Una vez procesados en esta línea, los subproductos obtenidos pasaban a ser los *inputs* de las nuevas líneas de montaje más pequeñas, en las que cada una de ellas terminaba la fabricación de un determinado producto específico.

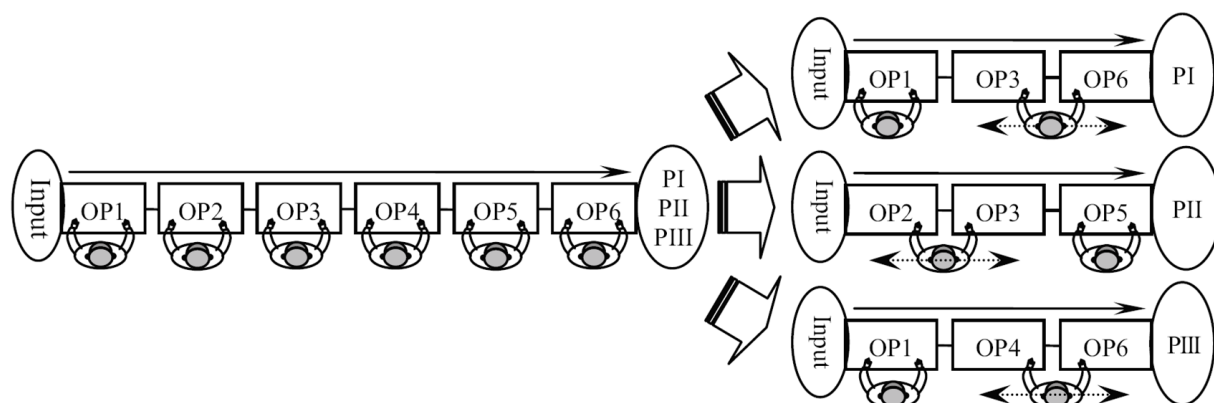


Figura 1. Reconfiguración de línea de montaje tradicional en líneas de menor tamaño [4].

Cuanto mayor es el número de líneas finales y menor es la longitud de las mismas, podemos afirmar que mayor facilidad supone la adaptación de los procesos de producción a los cambios característicos de los tipos de demanda dinámicos. Es decir, para aquellos mercados en los que rápidamente puede variar una de las características demandadas en el producto, el sistema permite una reconfiguración rápida y sencilla acorde a la adaptación requerida por dicho cambio [5].

Tras el éxito que supuso este nuevo enfoque en el diseño de los sistemas de producción ante fluctuaciones impredecibles de las características de los productos demandados, numerosas empresas japonesas adoptaron Seru Seisan, convirtiéndose en uno de los principales modos de gestión de la producción en Japón [6].

2.2.1 Líneas automáticas

Tal y como se ha comentado en la introducción al contexto de origen de Seru Seisan, el sistema de producción que disponía de una mayor popularidad en las empresas era la línea de transporte tradicional. En un contexto en el que la automatización había mostrado su enorme potencial, la búsqueda de la incorporación de las líneas de montaje en los procesos productivos era una constante en la gran mayoría de las empresas.

Estas líneas proporcionaban un nivel de calidad de producto elevado frente al coste que suponía su uso, ya que permitían optimizar un flujo de trabajo prácticamente constante, favoreciendo la producción en masa y permitiendo que la destreza requerida por parte de los trabajadores fuese menor.

El problema de las líneas de transporte radica en que, ante un cambio en las características del producto demandado, la reconfiguración requerida para satisfacer las nuevas especificaciones es difícil de implementar, puesto que carecen de flexibilidad [7].

2.2.2 Alta variabilidad de la demanda

Desde que el auge de la automatización de la producción mediante líneas de transporte llegase a su fase de mayor apogeo, las necesidades de los clientes han cambiado y sus exigencias se han ido enfocando cada vez de forma más específica. El grado de personalización de los productos adquiridos que se exige actualmente en el mercado ha ido aumentando de manera progresiva, hasta el punto de que las líneas de transporte pasan a ser ineficientes para hacer frente a la alta variabilidad en la demanda [8].

Por esta razón, la falta de flexibilidad comentada en el apartado anterior supone la incapacitación de las líneas automáticas de poner solución al alto grado de diversificación que presenta la demanda, dando pie al surgimiento de nuevos modos de producción que responden mejor a los requisitos de personalización de los clientes. Seru Seisan es uno de estos sistemas que mantienen la eficiencia de la producción a pesar de que tenga lugar una variación de las especificaciones de los productos con una alta frecuencia.

2.2.3 Volumen de demanda

Un aspecto estrechamente relacionado con el anterior es que el aumento en el grado de personalización de los productos conlleva necesariamente una reducción en el volumen de los lotes de productos iguales. Es decir, las constantes variaciones en los requisitos exigidos por los clientes en sus productos conducen a que el volumen de productos exactamente iguales entre sí sea menor, por lo que la principal ventaja de las líneas de transporte, que era su eficiencia para la producción masiva de unidades de producto iguales, queda descartada.

Del mismo modo, el alto nivel de fluctuaciones que existe actualmente en los volúmenes de demanda son otro impedimento para las líneas de transporte, cuya velocidad de producción es prácticamente fija y resulta muy difícil su adaptación a un entorno en el que dicha velocidad debería ser fácilmente variable. Seru Seisan aporta la capacidad de regular el volumen producido de manera sencilla y poco costosa, por lo que se trata de un sistema mucho más apropiado para la producción de elementos cuya naturaleza indica que su volumen de demanda será altamente inestable [9].

2.2.4 Incremento de la competencia en el mercado

El aumento de la competitividad entre las empresas pertenecientes a un mismo sector de mercado propicia el surgimiento de nuevos sistemas de producción más eficientes y que se adaptan mejor a las necesidades del consumidor. La globalización sirvió para incrementar la competencia entre las empresas, lo que dio lugar a

nuevas oportunidades con las que hacer frente al desafío de ser capaces de producir lo que el cliente espera, bajo sus condiciones cada vez más específicas y particularizadas, sin sacrificar el rendimiento económico.

Ante esta situación, numerosas empresas de fabricación japonesas, principalmente del sector de la electrónica, intensificaron el estudio de las medidas a adoptar para hacer frente a la presión ejercida por la competencia, buscando la innovación en sus procesos productivos y dando como origen a Seru Seisan [10].

2.2.5 Aparición del Sistema de producción Seru Seisan en Japón

La automatización en la industria japonesa había alcanzado grandes niveles de éxito antes de la explosión de la burbuja económica nipona (1986-1991). La inclusión de las líneas de transporte y todo tipo de elementos de automatización de la fabricación había tenido lugar de manera extendida, pero la explosión de la burbuja y la consecuente caída del mercado de valores provocaron una frenada en seco de la expansión tecnológica que esta extensión de la automatización llevaba asociada.

El alto coste de inversión que requiere la automatización de los procesos de producción dejó de ser una opción para las empresas japonesas, que además pudieron comprobar que la alta variabilidad de la demanda y las fluctuaciones en los volúmenes comentados en los apartados anteriores hacían de la automatización un modo de producción poco eficaz, sobre todo en comparación con la inversión de capital requerida para implementarla en sus plantas de producción [11].

Todo esto motiva el interés de las empresas en Japón por renovarse y encontrar métodos de gestión de la producción poco costosos y con un grado alto de fiabilidad y eficiencia. Esto, unido a los factores comentados en los apartados anteriores, supuso que las empresas japonesas comenzasen a reconfigurar sus líneas de montaje tradicionales en sistemas innovadores como Seru Seisan [12].

2.3 Características de Seru Seisan

El principal objetivo de los sistemas de producción Seru Seisan es aportar esa flexibilidad de la que las tradicionales líneas de transporte carecían, con el objetivo de hacer frente a los desafíos impuestos por la demanda y el contexto social y económico expuestos en el apartado anterior.

El primer paso lógico que hace pasar de una línea de transporte a un sistema configurado por serus es la división de dicha línea de transporte en serus, que son unidades de producción autónomas e individuales. Esto es algo que la fabricación celular tiene en común con los sistemas Seru Seisan, si bien se trata de una técnica completamente independiente.

Tradicionalmente, las agrupaciones denominadas “células”, características de la fabricación celular, provenían de la necesidad de los talleres de incrementar la eficiencia de sus procesos de producción, montaje y fabricación organizando las tareas y los recursos necesarios para las mismas en diferentes agrupaciones independientes entre sí. Por el contrario, las agrupaciones realizadas al adoptar los sistemas Seru Seisan proceden del desmantelamiento de sistemas automáticos montados en torno a líneas de transporte, con el objetivo de flexibilizar el sistema productivo [13].

Por estos motivos, una de las principales características del sistema de producción Seru Seisan es el grado bajo de automatización. Este hecho, unido a la necesidad de mejora continua inherente a la presencia de los productos en el mercado, promueve que los trabajadores se encuentren en un estado de continuo aprendizaje y mejora de sus habilidades [14], lo que fomenta su autoestima y eleva su moral de trabajo [9].

Para llevar esto a la práctica, los empleados se encuentran en constante comunicación con sus superiores, puesto que al ser ellos mismos los que realizan las labores y conocer los detalles de los procesos de primera mano, sus inquietudes y sugerencias aportan un gran valor a la optimización del sistema, además de servir como esbozo de las nuevas necesidades de formación que vayan surgiendo a lo largo del tiempo. Esta situación entre los trabajadores y sus superiores es beneficiosa, ya que el trabajador se siente escuchado y valorado, y ve como sus aportaciones sirven para mejorar su lugar de trabajo, lo que fomenta su compromiso de trabajo en equipo.

Las características expuestas hacen ver que el trabajador entrenado es clave para el desempeño de los sistemas de producción Seru Seisan. Por tanto, la formación impartida a los trabajadores tiene que llevarse a cabo antes de la reconfiguración del sistema a Seru Seisan, para evitar así posibles paros en la producción asociados a necesidades extra de aprendizaje que no hubieran sido previstas [15].

Cuando el sistema es reconfigurado, los trabajadores ya son capaces de realizar todas las tareas que se les requiere, que muy habitualmente pueden ser todas las necesarias para la elaboración de un determinado producto. Esto es debido a que en la producción Seru Seisan, cada seru está destinado a uno o varios productos, y se pretende que todas las labores relacionadas con su elaboración se puedan realizar en ese único seru.

Por lo tanto, un trabajador asociado a un determinado seru tendrá finalmente todas las habilidades requeridas por los productos que se obtienen del seru en el que trabaja. Puede darse el caso de que un seru requiera de un determinado recurso de otro seru, ocurriendo de este modo una colaboración entre serus, cuya naturaleza puede ser la necesidad de las habilidades de un trabajador asociado a ese otro seru para una determinada tarea o bien el uso de un equipo o herramienta, pero este tipo de cruces son poco habituales y algo que se pretende erradicar con la formación continua de los empleados.

Una buena práctica para fomentar la variedad en las capacidades de los trabajadores es llevar a cabo la rotación ocasional de estos a otros serus en los que puedan poner en práctica habilidades que no formen parte de su rutina

en su seru habitual. La versatilidad de los empleados favorece la flexibilidad del sistema, que es uno de los principales objetivos de Seru Seisan.

Por otro lado, la gran destreza que se consigue en los trabajadores sirve para agilizar la detección de posibles defectos de calidad en los productos, ya que con sus habilidades transversales son capaces de descubrir fallos o irregularidades en el conjunto del producto, algo que se incrementa aún más cuando ha sido el propio trabajador el que ha elaborado esa unidad desde el principio hasta el final. Por tanto, el trabajador está más capacitado para reparar desperfectos sin que el ritmo de producción se vea demasiado afectado, como ocurriría en un sistema automatizado [16].

Normalmente, los serus suelen diseñarse con las configuraciones más habituales para agilizar el trabajo, que son la disposición de los equipos y herramientas siguiendo una U o una L. Sin embargo, parte de la gran flexibilidad de Seru Seisan radica en que dichas configuraciones no se toman como definitivas, permitiéndose la reestructuración de los serus conforme surja la necesidad. La distribución de recursos en serus agrupados permite disponer del sistema de producción en su totalidad concentrado en un menor espacio que en el caso de procesos automatizados lineales.

2.4 Tipologías de Seru Seisan

El objetivo de este apartado es describir los tipos de serus más comunes que pueden encontrarse en las plantas en las que se ha adoptado este sistema de producción [13]. La clasificación que se detalla a continuación se realiza en base al flujo que sigue el producto desde el inicio hasta el final de su elaboración, así como del papel del trabajador que es asignado a dicho seru [17].

2.4.1 Divisional

Es el primer paso entre la línea de transporte tradicional automática y la producción Seru Seisan. Como indica su nombre, proviene de la división de la línea de transporte en líneas más pequeñas, que adoptan forma de agrupaciones individuales al curvarse en forma de U. De esta forma, cada una de ellas pasa a ser un seru en el que los trabajadores interaccionan entre sí, llevando a cabo una mayor variedad de tareas de lo que hacían en la línea tradicional.

Lo habitual es que el trabajador no esté totalmente quieto en un único puesto de trabajo, sino que se mueva entre varios consecutivos. Estos puestos, de forma ideal, no interferirán con el movimiento del resto de trabajadores del seru. Es decir, el proceso se diseña de tal manera que las tareas asociadas a cada empleado del seru requieran equipos y maquinarias adyacentes, evitando cruces y choques que puedan ralentizar el ritmo de la producción, o incluso provocar algún percance. Sin embargo, este movimiento siempre es entre

los mismos puestos de trabajo, y nunca recorriendo el sero entero. En la *Figura 2* se muestra un ejemplo de sero divisional:

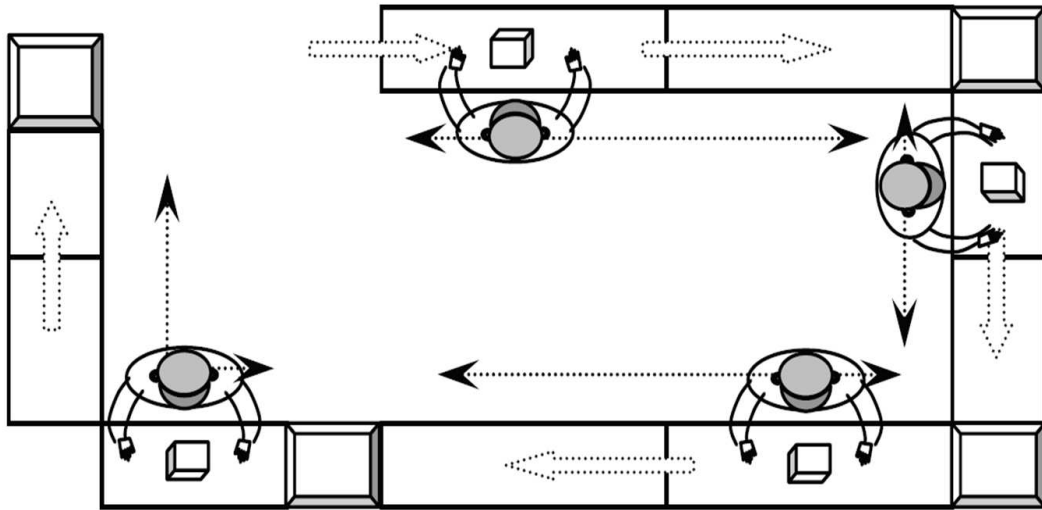


Figura 2. Seru divisional [18].

2.4.2 Rotativo

En la *Figura 3* se muestra un ejemplo de sero rotativo:

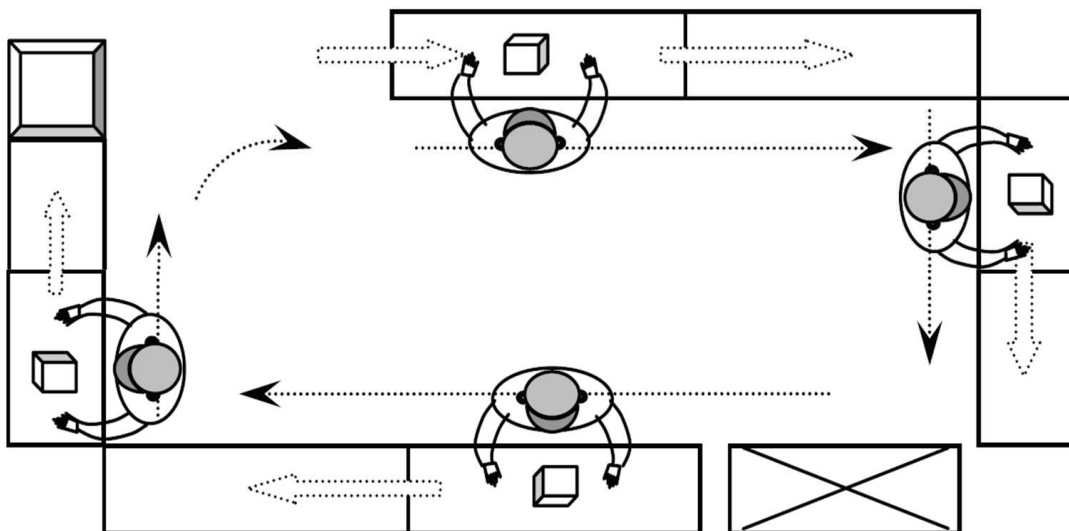


Figura 3. Seru rotativo [18].

Como puede verse, la principal diferencia que existe entre el sero rotativo y el divisional es que, en el rotativo, sí existe un movimiento completo de los trabajadores a lo largo de los distintos puestos de trabajo.

El operario comienza sus tareas al principio del sero, y conforme las va finalizando, va avanzando al siguiente puesto para continuar con la elaboración del producto. Una vez finalizada la unidad de producto,

el trabajador vuelve a comenzar con una nueva. Este proceso de rotación requiere que el ritmo de producción dentro del serú esté equilibrado, de manera que un operario nunca tenga que esperar a que termine sus labores el que se encuentra empleando el puesto de trabajo que necesita para continuar.

Este tipo de serú produce en el trabajador una sensación de logro y realización, al ser quien lleva a cabo la fabricación de cada unidad que produce desde el principio hasta el final. Para poder implementar este tipo de serús, primero es necesario pasar por el serú divisional, de manera que la formación constante y la mejora en las habilidades de los operarios les terminen permitiendo ser capaces de realizar todas las tareas del recorrido del proceso productivo.

2.4.3 *Yatai*

El serú *yatai* puede ser considerado como la máxima expresión de la filosofía perseguida por Serú Seisan. Si los principales objetivos de Serú Seisan son la división del trabajo y fomentar la capacidad de los trabajadores para realizar el máximo número posible de tareas de diferente naturaleza, en el serú *yatai* se consigue esto en su totalidad, asignando un único trabajador al serú, que será quien realice toda la producción de manera individual y sin interferencias con ningún otro operario.

En la *Figura 4* se muestra un esquema de este tipo de serús:

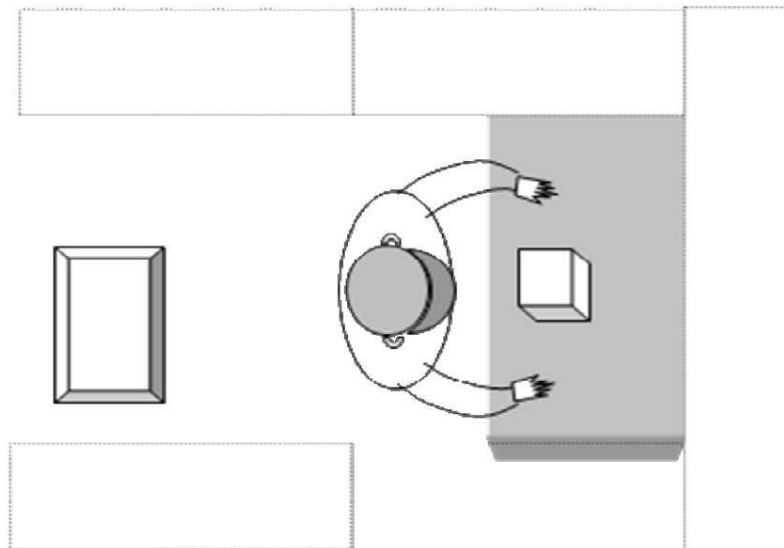


Figura 4. Yatai [4].

La adaptación del espacio de trabajo es tal que no existe necesidad de grandes desplazamientos a lo largo de las líneas pequeñas que conforman el serú. Es decir, se distribuye el equipo necesario para la elaboración del producto de forma que el trabajador pueda alcanzar todo lo que requiera en cada momento en lo que se podría considerar prácticamente una única estación de trabajo, a diferencia de los serús anteriores, en los que existían

varias de ellas.

Con respecto al serú rotativo, posee la ventaja de que no existe necesidad de sincronización con otros trabajadores. Mientras que en el serú rotativo cada trabajador debía finalizar al mismo tiempo las tareas que estaba haciendo en su actual puesto de trabajo antes de desplazarse al siguiente para garantizar la sincronización y evitar cuellos de botella, en el serú *yatai* toda la producción del serú depende por completo de él.

Estos tres tipos de serus descritos, divisional, rotativo y *yatai*, exigen respectivamente mayores habilidades y capacidades transversales por parte de los trabajadores, por lo que podría considerarse que una empresa que decida adoptar el sistema de producción Serú Seisan podría evolucionar modificando la tipología de sus serus conforme sus trabajadores fuesen incrementando sus capacidades progresivamente gracias a la formación continua.

2.5 Ventajas e inconvenientes de Serú Seisan

El objetivo del presente apartado es enumerar las principales ventajas e inconvenientes de los sistemas de producción Serú Seisan desde diferentes puntos de vista. Con esto, se pretende proporcionar una visión general de las condiciones en las que adaptar este sistema de producción es conveniente.

2.5.1 Ventajas

A continuación, se enumeran las principales ventajas de Serú Seisan.

2.5.1.1 Flexibilidad

En comparación con la línea de montaje tradicional, Serú Seisan aporta una gran flexibilidad para hacer frente a la variabilidad de la demanda. Tanto en cuestión de personalización de los productos como en fluctuaciones de volumen demandado, Serú Seisan permite una adaptación ágil y respuesta rápida [19]. La distribución en serus permite ajustar la velocidad de la producción y la reconfiguración necesaria para lidiar con cambios en las condiciones impuestas por la demanda [20].

2.5.1.2 Makespan

En relación con el punto anterior, se deduce que los sistemas Serú Seisan permiten disminuir el tiempo de entrega de los diferentes productos, dado que la configuración de este tipo de sistemas es mucho más rápida que la de una línea automática [6].

Esto implica que, ante modificaciones de la demanda, la adaptación a un sistema totalmente nuevo puede ser

resuelta sin penalizar excesivamente la fecha *deadline* de los productos. Igualmente, la disposición de todos los elementos necesarios para la fabricación del producto agrupados en un serú permite que los desplazamientos durante su elaboración sean mucho menores [21].

2.5.1.3 Inventario

Puesto que la cantidad producida se ajusta fácilmente a las necesidades reales impuestas por la demanda, se evita la necesidad de disponer de un gran inventario de productos finalizados como ocurriría en la producción de una línea automática. Del mismo modo, no se requieren inventarios de productos intermedios para evitar bloqueos en la producción, ya que cada producto es obtenido en un serú independiente de principio a fin [6].

2.5.1.4 Reducción del impacto de fallos

La independencia inherente a la división de la producción en serús individuales proporciona la ventaja de que, ante un posible fallo de producción debido a la ausencia de un trabajador o a materiales de partida defectuosos, el único serú perjudicado sería aquel en el que se localiza el fallo de origen. Por lo tanto, el resto de serús pueden continuar con la producción tal como harían habitualmente y el efecto del problema surgido no tiene impacto en el resto de serús [1].

2.5.1.5 Bajo coste

Los equipos empleados para la producción en serús son significativamente menos costosos que las líneas automatizadas de montaje. El trabajo en serús es marcadamente más manual que en las líneas de montaje, por lo que las maquinarias empleadas para la realización de las tareas son menos sofisticadas, lo que significa una reducción de costes tanto en la adquisición de los equipos de los serús como en su mantenimiento posterior [22].

2.5.1.6 Enriquecimiento de trabajadores

En un sistema Serú Seisan, los trabajadores se encuentran en un estado de constante incremento de sus habilidades. En comparación con los trabajadores de una línea automática, dedicados a un número limitado y fijo de tareas específicas, los empleados de un serú ven mejorada su destreza y sus capacidades de manera progresiva, lo que les hace cada vez más valiosos y aporta una gran autonomía [9].

2.5.1.7 Sensación de equipo

Relacionado con el punto anterior, puede deducirse que los trabajadores, al estar en posesión de grandes facultades y poder por tanto diseñar mejoras y perfeccionamientos en el sistema actual, comunican sus inquietudes tanto al resto de trabajadores como a sus superiores, y esto les permite sentirse parte de la empresa e incrementar su implicación con el equipo [9].

2.5.2 Inconvenientes

De igual forma que en el apartado anterior, se procede a enumerar a continuación las desventajas asociadas a los sistemas de producción Seru Seisan.

2.5.2.1 Volumen de demanda alto

El rendimiento de los sistemas Seru Seisan es inferior al de una línea automática en aquellos casos en los que el volumen demandado de producto es demasiado alto y la variedad exigida en el mismo es baja. En estos casos, como pueden ser por ejemplo fábricas de distintos tipos de envases, se obtiene una eficiencia mayor empleando sistemas automáticos de producción.

En este tipo de demandas, no suele existir la necesidad de reconfigurar el proceso de producción con frecuencia, y además el volumen demandado suele ser bastante estable, o bien sufrir variaciones que pueden asumirse fácilmente en el sistema automatizado, sin tener un impacto significativo en la producción. Por tanto, para este tipo de demandas, Seru Seisan no es un sistema apropiado [9].

2.5.2.2 Costes de entrenamiento

Tal como se ha comentado, el objetivo de Seru Seisan es disponer de trabajadores altamente cualificados capaces de realizar tareas que abarquen un gran rango de posibilidades. Esto implica que en la planta existen actividades de formación que se convocan con una gran asiduidad, lo que implica costes de entrenamiento más elevados de los que están presentes en otros sistemas de producción [2].

La formación de los trabajadores no se da por finalizada hasta muy avanzadas sus capacidades, e incluso en dichos casos puede seguir siendo necesario continuar con el aprendizaje cuando surgen nuevos productos que se quieren ofrecer al mercado y que incluyen características que requieren labores totalmente diferentes a las realizadas en los productos anteriores [22].

2.5.2.3 Aumento de responsabilidad en los trabajadores

El hecho de disponer de trabajadores altamente cualificados incrementa lo que se espera de ellos, de manera que, por ejemplo, un empleado con formación en todas las tareas asociadas a un producto determinado debe ser capaz de darse cuenta de que existe un fallo de calidad en cualquiera de las características de dicho producto. Esto puede ejercer presión sobre los trabajadores, que ya no sólo tienen la labor de fabricar los productos y realizar sus tareas, sino que tienen que mantener un nivel de atención al detalle que puede sentirse como un extra de responsabilidad constante.

Igualmente, la posibilidad de proponer sus ideas y mejoras a sus superiores y que éstas sean tenidas en

consideración también puede suponer un aumento de estrés en el trabajador, que puede sentirse responsable de problemas ocasionados por la puesta en marcha de sus propuestas. Del mismo modo, la ausencia de ideas que comunicar a sus gestores cuando éstos le preguntan puede acrecentar su nivel de responsabilidad de un modo negativo y resultar una desventaja para el operario.

2.5.2.4 Rechazo de los trabajadores a la formación continua

Con relación a lo expuesto en el apartado anterior, también existe la posibilidad de que el trabajador prefiera su situación previa en la línea automática, por no estar interesado en ampliar su formación y considerarlo como una carga extra de trabajo. Es decir, el empleado prefiere realizar poca variedad de tareas y no tener la necesidad de adquirir nuevas habilidades, algo que le sitúa contra la reconfiguración y con predisposición a no aprovechar las sesiones de aprendizaje.

Con respecto a esta situación, resulta de interés hacer ver desde el principio a los empleados las ventajas que tiene la adquisición de habilidades transversales para su enriquecimiento personal, realizar siempre las jornadas de entrenamiento en el horario de trabajo y enfocarlas desde el punto de vista su propio beneficio.

2.5.2.5 Posible reducción de personal

La disponibilidad de trabajadores altamente cualificados y capaces de realizar labores de una gran diversidad puede resultar en una reducción de las necesidades de personal, puesto que el usual reparto de tareas según la especialidad de cada empleado ahora carece de sentido, pudiendo ser asignadas todas las tareas a todos los operarios [23].

2.6 Sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad en un sistema de producción puede ser enfocado desde tres perspectivas independientes entre sí: medioambiental, económica y social. Estos tres ámbitos en los que se enmarca la sostenibilidad pueden ser medidos mediante indicadores, que contabilizan cómo es el desempeño de un sistema productivo desde el punto de vista cada uno de ellos. El diseño de estos indicadores para la producción Seru Seisan tendría que llevarse a cabo de manera específica según las características de los procesos y del resultado de la configuración.

La comunicación a los empleados de la evolución seguida por los distintos indicadores de sostenibilidad ejerce un efecto positivo en el trabajador, que adquiere una visión global de la mejora experimentada por la empresa en la que trabaja y es consciente de lo que se está consiguiendo con los cambios implementados en su área de trabajo [3].

En el presente apartado se analizan los resultados que produce el sistema de producción Seru Seisan en los tres ámbitos de sostenibilidad descritos [9].

2.6.1 Sostenibilidad en el medio ambiente (ENP)

La sostenibilidad medioambiental busca la reducción del impacto medioambiental que tienen los procesos de fabricación asociados a la producción del sistema. Con esto, se busca disminuir el consumo energético, las emisiones de sustancias contaminantes a la atmósfera, así como de residuos peligrosos y no peligrosos, no sólo hasta los límites exigidos por la legislación pertinente, sino lo máximo que sea posible sin afectar a la calidad del producto.

También se pretende eliminar el empleo de materiales peligrosos durante el proceso productivo. Por otro lado, también se persigue la eficiencia energética, consistiendo ésta en la consecución de una mayor cantidad de trabajo productivo mediante un menor consumo de energía para ello.

Un ejemplo de mejora de la eficiencia energética en sistemas de producción puede ser el empleo de la cogeneración, de manera que cuando un determinado proceso genera gases de salida a alta temperatura, y otro proceso diferente requiere del aporte de calor para ser llevado a cabo, el sistema se configura de manera que se aprovecha el calentamiento de salida de un proceso para alimentar otro diferente, incrementándose el rendimiento energético notablemente.

El empleo de trabajadores con habilidades para realizar múltiples tareas puede resultar beneficioso desde el punto de vista de la sostenibilidad medioambiental debido a que se reducen los movimientos de productos requeridos respecto a cuando son varios los empleados involucrados en su producción. Del mismo modo, también se ve reducido el tiempo de espera necesario para la coordinación en el traspaso de productos inacabados de un trabajador al siguiente, puesto que se trata del mismo empleado el que realiza las tareas. Por lo tanto, se acorta el tiempo de producción, lo que tiene como beneficio una reducción en el consumo energético de los equipos.

Por otro lado, al llevarse a cabo una reconfiguración en la que los equipos empleados son más rudimentarios, se induce en una mejora del rendimiento medioambiental puesto que la producción pasa a ser mucho más manual y artesanal que en el caso de una línea automatizada. Esto tiene como consecuencia no sólo una bajada en el consumo asociado a los grandes equipos automatizados, sino también respecto al uso de los materiales contaminantes asociados a la maquinaria y a sus residuos de funcionamiento. Los recursos empleados tienen normalmente poco consumo y emisiones de CO₂.

Igualmente, el paso de líneas automáticas a serus es positivo para el medio ambiente puesto que con los serus se suprime la necesidad de estaciones de trabajo intermedias que sí son requeridas por una línea automática cuando

ésta procesa productos diferentes. Al trabajar cada serú de manera independiente en cada producto, esto deja de ser necesario, lo que ahorra espacio y equipos, con la consecuente reducción de las emisiones de CO₂ y de las necesidades de aire acondicionado en la planta.

Finalmente, la mejora en el sistema de entrega asociado a la reconfiguración Serú Seisan beneficia la sostenibilidad medioambiental porque la distribución de las unidades generadas en lotes de volumen reducido permite que la producción requiera menor espacio de trabajo. El efecto de la versatilidad de la reconfiguración del sistema que se adapta a la demanda en todo momento permite la entrega de los productos justo en el momento en el que se necesita, lo que sirve para prescindir de una gran capacidad de inventario, que puede requerir condiciones de climatización y un consumo energético extra.

2.6.2 Sostenibilidad económica (ECP)

La sostenibilidad económica busca incrementar las posibilidades de supervivencia de la empresa a lo largo del tiempo, reduciendo al máximo los costes de fabricación y mejorando el rendimiento financiero y no financiero. Sin embargo, a menudo los requerimientos exigidos por la sostenibilidad económica y del medio ambiente se encuentran enfrentados, siendo habitualmente más económicamente sostenible una compañía que no prioriza la sostenibilidad ambiental. Esto es debido a que los recursos necesarios para llevar a cabo procesos productivos de bajo impacto en el medio ambiente son normalmente más costosos.

Sin embargo, como se detalla a continuación, los sistemas de producción Serú Seisan, aparte de promover la sostenibilidad del medio ambiente, como se ha comentado en el apartado anterior, también permiten mejorar la sostenibilidad económica en diferentes aspectos.

El empleo de trabajadores altamente cualificados característico de los sistemas Serú Seisan permite la reducción de las necesidades de personal en la planta de producción, ya que, al ser capaces de realizar tareas de todos los ámbitos que se necesita, no surge la necesidad de contratar operarios de cada vertiente para llevar a cabo la elaboración completa de los productos.

Por otro lado, el empleo de un menor número de trabajadores facilita la sincronización en la producción entre los mismos, puesto que con menos trabajadores existe un menor factor de riesgo de que se produzcan desequilibrios en el ritmo de producción, reduciéndose consecuentemente las necesidades de inventarios de seguridad con sus costes asociados.

Por otro lado, el empleo de equipamientos específicos y personalizados para las tareas de producción requeridas, en lugar del uso de grandes líneas automáticas, elimina funcionalidades innecesarias en el proceso y esto disminuye los costes asociados a las mismas. Además, los equipos diseñados específicamente para las tareas a realizar se pueden reproducir sin incurrir en grandes costes.

El paso de las líneas automáticas a la configuración en Seru implica poder prescindir de grandes y costosos equipos como cintas transportadoras o brazos robóticos que realizan determinadas tareas a lo largo de las mismas. Los costes de inversión cuando se diseña un sistema como Seru Seisan siempre son inferiores a los requeridos por un sistema automatizado, y además la amortización de los bienes adquiridos es mucho más rápida en un sistema Seru Seisan que en uno de líneas automáticas. Del mismo modo, las tareas de mantenimiento en un sistema automatizado son significativamente más costosas, por tratarse de equipos más sofisticados. De esta manera, Seru Seisan mejora el rendimiento económico.

También cabe señalar que, en este sistema de producción, los medios de transporte empleados para la distribución son más pequeños como parte de la propia esencia de Seru Seisan. Es decir, se llevan a cabo entregas de lotes de volumen reducido con el objetivo de tener la capacidad de adaptarse a cambios inesperados en las características del producto y en la cantidad demandada. El empleo de estos medios de transporte en lugar de grandes camiones implica una menor inversión inicial en los mismos, así como menores requerimientos de mantenimiento.

2.6.3 Sostenibilidad social (SOP)

La sostenibilidad social trata de la aportación de oportunidades de trabajo y de realización profesional a diferentes sectores de la población, llegando a todos los colectivos y ofreciendo la posibilidad de progreso y autosuficiencia a sus empleados, sin discriminaciones y fomentando la calidad de vida de los trabajadores.

El empleo de trabajadores con un alto grado de formación en una amplia gama de actividades diferentes favorece sin duda la sostenibilidad social, enriqueciendo desde el punto de vista personal y de sus competencias a los empleados, y aportándoles un mayor abanico de posibilidades en su trayectoria profesional. Del mismo modo, el trabajador se siente más realizado cuanto más capaz es de desempeñar funciones de distinta naturaleza.

Además de favorecer socialmente al trabajador, también se cuida al cliente, puesto que la facilidad de adaptación a los cambios en los requerimientos impuestos por la demanda permite dar una respuesta rápida y satisfacer lo que se espera del sistema en términos de calidad y disponibilidad.

Sin embargo, tal como se comentó en el apartado anterior, Seru Seisan puede ocasionar la reducción de las necesidades de personal, lo que puede entenderse como una desventaja desde el punto de vista del desempeño social. Aún con esto, normalmente los trabajadores pueden ser reasignados a otros ámbitos de la empresa donde puedan aportar valor con su experiencia y conocimiento de los productos, pero sigue siendo necesario encontrar la forma de hacer confluir estos aspectos de manera que el resultado sea positivo en ambos aspectos de sostenibilidad.

En cuanto al cambio de los equipos empleados para las labores de producción, el rediseño de la planta realizado

al adoptar Seru Seisan implica el empleo de máquinas y herramientas cuya configuración es más flexible y adaptable a los gustos del trabajador. Esto tiene efectos positivos en términos de ergonomía y prevención de riesgos laborales, puesto que el empleado tiene la posibilidad de adaptar el puesto de trabajo a sus necesidades de forma más amplia que en un sistema automatizado, y además la reducción de ruido producido por el cambio a los equipos de bajo coste de Seru Seisan mejora las condiciones ambientales del operario en su entorno de trabajo. Por tanto, es otro aspecto en el que la sostenibilidad social se ve reforzada de manera positiva.

Por su parte, la configuración en serus en lugar de en una línea automática puede fomentar la competitividad entre empleados de serus que trabajan simultáneamente en el mismo producto, algo que puede tornarse en un método de motivación para los operarios y que puede dar pie al empleo de técnicas con las que estimular el rendimiento del trabajador. Igualmente, la distribución en serus permite adaptarnos a las exigencias de la demanda, de forma que con la división de la producción en serus se incrementa la sostenibilidad social desde ambos puntos de vista.

Por último, la mejora conseguida con respecto a los sistemas de entrega de producto también ejerce un efecto positivo en la sostenibilidad social. Los empleados asignados a las tareas de distribución de los productos, al ser trabajadores versátiles y formados en todos los ámbitos del sistema, también conocen las tareas asociadas a la producción, lo que permite mejorar la comunicación entre todos los miembros del proceso de producción y los de entrega, favoreciendo un ambiente de trabajo positivo en el que existe intercambio fluido de información. Del mismo modo, un trabajador asignado al reparto de productos puede detectar anomalías en las unidades de los lotes que está transportando y comunicar las necesidades de recurrir a otro lote para satisfacer al cliente. Por lo tanto, nuevamente la sostenibilidad social se ve reforzada con el sistema Seru Seisan.

2.7 Técnicas de resolución para la reconfiguración Seru Seisan

En este apartado se lleva a cabo una revisión detallada de las diferentes técnicas existentes en la actualidad para la implementación de los sistemas Seru Seisan en los entornos de producción de las empresas, estudiándose los factores más importantes a tener en consideración y los distintos enfoques que pueden hacerse del problema.

En primer lugar, se realiza una breve introducción de los diversos tipos de estrategias que se consideran a la hora de reconfigurar una línea automática tradicional a un sistema formado por serus, justificando la relación de cada una de dichas estrategias con los objetivos perseguidos por la producción Seru Seisan.

Tras esto, se detalla la información relativa a las principales técnicas de resolución del problema que han sido publicadas por los autores más relevantes del panorama internacional de investigación en Seru Seisan, siendo la gran mayoría de los artículos empleados de origen japonés.

Para llevar esto a cabo, se ha tomado como referencia el recopilatorio del estado del arte de Seru Seisan realizado

por Luis de Lara Prats en 2017 [1], en el que se proporciona un análisis detallado de los procedimientos propuestos por los principales autores en la materia. En el apartado Descripción de técnicas desarrolladas en el panorama actual, se ha realizado una clasificación de dichos procedimientos según la naturaleza de su objetivo: análisis teórico, análisis empírico, modelado matemático o simulación.

Del mismo modo, y a modo de resumen al final de la descripción de cada técnica, se especifican las tecnologías y estrategias descritas en el apartado Tácticas para la implementación de Seru Seisan que han sido adoptadas por cada uno de los autores citados.

2.7.1 Tácticas para la implementación de Seru Seisan

Se procede en este apartado a describir varias de las principales tácticas que se emplean a la hora de reconfigurar un sistema de producción tradicional a uno de tipo Seru Seisan y que ya han sido mencionadas en apartados anteriores. Las referencias a cada uno de los artículos en los que se mencionan estas técnicas se encuentran detalladas en el apartado siguiente, donde se profundiza en el contenido de cada uno de ellos.

2.7.1.1 Trabajadores con habilidades transversales (MWA)

Como ya se ha comentado con anterioridad, la formación cruzada de los empleados es un factor crucial para Seru Seisan, ya que de ellos depende en gran medida la capacidad de adaptación del sistema a la alta variabilidad de la demanda a la que se pretende hacer frente.

2.7.1.2 Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)

Se trata del primer paso hacia Seru Seisan. Es decir, es la forma más suave y de menor impacto de comenzar la adaptación del sistema tradicional a Seru Seisan, ya que éste continúa estando formado por pequeñas líneas individuales que provienen de la división de la línea automática inicial.

2.7.1.3 Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)

Mediante esta táctica, los recursos utilizados por los trabajadores para realizar sus tareas son más rudimentarios, y a la vez, más específicos para las características actuales que se desean obtener en el producto. El reemplazo de grandes y costosos equipos automatizados por herramientas más sencillas aporta una gran flexibilidad a la hora de su adaptación a los requisitos de los productos que han sido impuestos por la demanda en cada momento.

2.7.1.4 Filosofía de mejora continua (COI)

El concepto de Seru Seisan está muy relacionado con la filosofía de mejora continua. Puesto que se trata de un sistema flexible y que busca la adaptación rápida a las condiciones impuestas por el entorno, surge la necesidad

de buscar caminos que posibiliten el éxito. Según esta táctica, se busca que los trabajadores sean cada vez mejores en sus tareas, que los serus sean cada vez más eficientes y que la respuesta ante un cambio de contexto brusco sea cada vez más ágil.

2.7.1.5 Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)

Relacionado con el empleo de trabajadores con multitud de habilidades cruzadas surge el fomento de la cultura de aprendizaje. Mediante esta táctica, se pretende que los trabajadores no sólo experimenten una formación continua, sino que además sean conscientes del valor que esta formación les aporta y la reciban de manera voluntaria y con motivación de superarse a sí mismos.

2.7.1.6 Estudio de la distribución (*layout*) óptimo para Seru Seisan (SLS)

Con esta táctica se busca realizar un análisis en profundidad de cuál es la mejor distribución de los serus dentro del entorno de trabajo, así como de la propia disposición de los puestos de trabajo dentro de cada uno de los serus. Eligiéndose un *layout* óptimo, se busca reducir la necesidad de movimientos de los trabajadores y de transporte de los productos por la fábrica, así como favorecer la comodidad del operario al disponer de todos los equipos necesarios para realizar sus tareas organizados y al alcance de su posición.

2.7.1.7 Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)

Se pretenden perfeccionar los métodos de entrega de lotes de productos, así como las rutas seguidas, de manera que la frecuencia con que se realicen estos procesos permita un flujo equilibrado de entrega de productos que esté acorde con el ritmo de la producción.

2.7.2 Descripción de técnicas desarrolladas en el panorama actual

A continuación, se presentan las principales técnicas existentes en la actualidad para la resolución del problema de reconfiguración de un sistema de producción tradicional a uno Seru Seisan que aparecen en el recopilatorio realizado por Luis de Lara Prats en 2017 [1]. Estas técnicas representan el estado del arte de Seru Seisan en el mundo de la investigación en la actualidad.

Para llevar a cabo el presente análisis, las diferentes técnicas de implementación de Seru Seisan han sido clasificadas siguiendo como criterio la naturaleza de cada uno de los estudios en cuestión. Es decir, se han agrupado por separado aquellas en las que se realiza un análisis teórico de Seru Seisan, un estudio empírico o un modelado matemático a resolver mediante técnicas de optimización.

2.7.2.1 Análisis teórico

En este apartado se recogen los principales artículos de investigación que presentan un análisis de Seru Seisan desde el punto de vista teórico.

Conditions for successful implementation of assembly cells [24].

Se realiza un estudio del contexto que debe rodear a un sistema de producción para que la reconfiguración a Seru Seisan tenga éxito.

Tras el análisis, se concluye que las condiciones necesarias en el entorno para el éxito de Seru Seisan son que existan cambios bruscos en el volumen demandado, así como necesidad de modificar el resultado para actualizar las características del producto, que el sistema de entrega esté configurado en lotes pequeños debido a la alta variedad de productos y que la obtención de un alto volumen de productos sea posible con respecto al tiempo total empleado.

En relación con los productos en sí, se necesita que los mismos y sus componentes sean de reducido tamaño, algo frecuente en la industria electrónica, y que la cantidad de elementos para llevar a cabo el montaje sea igualmente pequeña.

También se deduce del artículo que se requiere el empleo de trabajadores con formación cruzada sin tener necesidad de que éstos alcancen un alto grado de maestría, así como que no sea necesario emplear maquinaria costosa o equipos de gran tamaño.

De las tácticas descritas en el apartado anterior, en este artículo se hace uso de las que se muestran en la *Tabla 1*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 1. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [24].

Como conclusiones, las ventajas que aporta Seru Seisan son las siguientes:

- Mayor eficiencia en las líneas de tipo serus para sistemas de entrega basados en pequeños lotes.

- Menores costes de inversión que en un sistema de producción tradicional.
- Reducción del tiempo de entrega de los productos.
- Reducción del espacio requerido por el proceso productivo.
- Incremento de la calidad de producto.

The shift from belt conveyor line to work-cell based assembly systems to cope with increasing demand variation and fluctuation in the Japanese electronics industries [25].

En este artículo, Miyake analiza la reconfiguración de los sistemas de producción tradicionales bajo la necesidad de ofrecer una respuesta ágil a los cambios en las condiciones que impone el mercado de manera específica focalizando en los aspectos relacionados con el factor humano.

Las tácticas empleadas en este artículo se especifican en la *Tabla 2*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✗
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 2. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [25].

El autor analiza los costes, la flexibilidad del sistema, los tiempos de producción y calidad de producto, así como la reducción de espacio y de inventarios respecto a los sistemas de producción automatizados o la fabricación celular.

La principal ventaja de la producción Seru Seisan que se extrae de este artículo es el incremento en la flexibilidad y capacidad de respuesta del sistema ante cambios bruscos en el volumen y características de la demanda que un sistema de producción tradicional.

The evolution of seru production systems throughout Canon [26].

Se analiza la evolución de los sistemas de producción japoneses, culminando en el estudio del desarrollo de los sistemas Seru Seisan haciendo uso de la aplicación del mismo por la empresa Canon. El objetivo

de este artículo es dar al lector una visión de los principales aspectos en los que Seru Seisan ha servido de ayuda a la empresa Canon.

Las técnicas empleadas por los autores de este artículo son las que se detallan en la *Tabla 3*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✓
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 3. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [26].

El estudio de Seru Seisan gira en torno al trabajador, al entrenamiento cruzado y a las habilidades adquiridas con el mismo, así como a la personalización del equipo empleado por los operarios para favorecer su desempeño. También se hace hincapié en la aplicación a Seru Seisan del método 5S: *seiri* (clasificación), *seiton* (organización), *seiso* (limpieza), *seiketsu* (estandarización) y *shitsuke* (disciplina, compromiso con la empresa).

La ventaja de la aplicación de Seru Seisan que se extrae del contenido de este artículo es la capacidad de este sistema de producción para incrementar el rendimiento cuando se le aplican los conceptos *kanketsu*, que implica que se dispone de todo lo necesario dentro del seru para llevar a cabo la producción de un tipo de producto, y *majime*, que impone que los equipos empleados por el trabajador estén distribuidos de forma eficiente y organizada.

Seru Seisan - An innovation of the production management mode in Japan [4].

El objetivo de este artículo es proporcionar una visión global de los sistemas de producción Seru Seisan, enumerando sus principales ventajas e inconvenientes, y detallando cómo y por qué surgió. También se detallan las principales diferencias que existen entre la fabricación celular y la producción Seru Seisan, ya que ambas se caracterizan por la agrupación de tareas y equipos en unidades de trabajo independientes y es algo que puede llevar a confusión al lector.

Igualmente, se refleja que se trata de un sistema de producción con un claro enfoque en el factor humano, expresando la necesidad de disponer de trabajadores con habilidades transversales. También se analiza la gran capacidad para mejorar la eficiencia de la producción que ofrece Seru Seisan, así como su rápida respuesta ante fluctuaciones de la demanda.

Las tácticas que se emplean en Seru Seisan según los autores en este artículo se detallan en la *Tabla 4*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✓
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 4. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [4].

De las conclusiones de este artículo se extrae que numerosas empresas japonesas se han beneficiado de la implementación del sistema Seru Seisan.

Seru: the organizational extension of JIT for a super-talent factory [27].

Se analizan los motivos por los cuales el sistema de producción Toyota no aportaba eficiencia a las empresas de la industria electrónica, caracterizada por el ciclo de vida corto del producto y la alta variabilidad de la demanda.

Desarrollando de manera progresiva la historia de los sistemas Seru Seisan, se ofrece una clasificación de los distintos tipos de serus y sus principales características. Del mismo modo, se insiste en la centralización de estos sistemas en el componente humano de la producción y en la importancia de las habilidades transversales de los trabajadores, así como en el interés de disponer de una estructura organizacional que contemple las necesidades de formación continua.

También se desarrollan los conceptos relacionados con la correcta disposición de los equipos, las herramientas personalizadas para el trabajador y la importancia de la reducción del espacio de trabajo.

Las tácticas citadas y desarrolladas por los autores del artículo son las que se detallan en la *Tabla 5*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✓
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 5. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [27].

En el artículo se detalla como Canon, Fujitsu, LG, Panasonic, Samsung y Sony aprovecharon las ventajas ofrecidas por Seru Seisan, comentándose los beneficios adquiridos en cuestión de mano de obra requerida,

necesidades de espacio e inventarios intermedios y de productos completados, así como en los tiempos de producción e instalación.

From JIT to Seru, for a production as lean as possible [18].

El objetivo de este artículo es ilustrar al lector sobre la evolución desde el sistema de producción *Just In Time* al correspondiente a Seru Seisan, con el objetivo de divulgar sus múltiples ventajas de manera internacional.

En primer lugar, se realiza una descripción detallada de la metodología JIT, para posteriormente definir Seru Seisan como la descentralización de dicho sistema mediante la formación cruzada de los trabajadores para cuyo fomento se menciona el empleo de competiciones entre serus independientes.

Las tácticas comentadas en este artículo son las que se muestran en la *Tabla 6*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✗
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 6. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [18].

También se detalla el proceso mediante el cual las grandes líneas automáticas son divididas en líneas más pequeñas, incrementando la flexibilidad del sistema, reduciendo las necesidades de inventarios y el tiempo de producción.

An implementation framework for seru production [13].

El objetivo principal de este artículo es ofrecer al lector determinadas pautas a seguir cuando se decide implementar el sistema de producción Seru Seisan. Para ello, se analizan casos reales de reconfiguración de sistemas de empresas japonesas, estudiándose los pasos seguidos y el resultado obtenido tras ello. De esta forma, finalmente lo que se obtiene una guía de configuración de Seru Seisan en múltiples situaciones de partida diferentes, lo que aporta un gran valor a la difusión de este sistema de producción.

Esta guía podría resumirse de manera esquemática en seguir los pasos que se detallan a continuación:

1. Análisis de los productos que se fabrican desde el punto de vista de las tareas requeridas y del tiempo que requiere la obtención de cada unidad.
2. Se estudia cómo debe enfocarse la elección del tipo de seru según las situaciones posibles que pueden darse en el entorno.
3. Se establecen las relaciones entre los serus, en caso de existir, y se definen el tiempo y la ruta de entrega de cada tipo de producto.
4. Se realiza el equilibrado del sistema de producción.
5. Se analiza la distribución de los trabajadores por serus, calculando los costes de entrenamiento requeridos para cada combinación posible y eligiendo la más beneficiosa.

Las tácticas a las que se refieren los autores del artículo se resumen las que se detallan en la *Tabla 7*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 7. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [13].

La principal ventaja de Seru Seisan que se extrae de este artículo es el hecho de que es posible alcanzar la flexibilidad de un sistema tipo taller y la gran eficiencia de los sistemas automatizados frente a demandas fluctuantes. Como añadido, esto es posible de alcanzar mediante procesos que favorecen la sostenibilidad del sistema.

2.7.2.2 Análisis empírico

De manera análoga al apartado anterior, se exponen a continuación los artículos cuyo enfoque sobre Seru Seisan ha sido de naturaleza empírica.

Cell production and workplace innovation in Japan: toward a new model for Japanese manufacturing [28].

Los autores llevan a cabo un estudio mediante encuestas y entrevistas realizadas a cuatro empresas del sector electrónico, desvelándose la relación existente entre la división del trabajo en células independientes y los beneficios obtenidos, que se ven incrementados.

Se analiza la descentralización que conlleva que sean las propias fábricas las que lleven a cabo las gestiones con los clientes en cuanto a los procedimientos de entrega de los lotes, con lo que las sedes corporativas de las empresas pasan a un papel cada vez más de coordinación en alto nivel. Las tácticas empleadas por los autores de este artículo se recogen la *Tabla 8*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 8. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [28].

También se estudian los sistemas de fabricación *Make-To-Order*, mediante los cuales se incrementa el flujo de comunicación con proveedores y clientes, lo que permite optimizar los costes y la gestión de los inventarios.

Del mismo modo, se concluye que el aumento de los beneficios económicos, tanto generales como operacionales, se dan de manera más acusada cuando el sistema de entrega de productos se basa en lotes de volumen reducido y gran variedad.

Some considerations relating to the reintroduction of assembly lines in the Swedish automotive industry [29].

Este artículo actúa de manera contrapuesta al resto de artículos que se describen en este proyecto. Mientras que lo habitual está siendo la consideración de la reconfiguración de los sistemas de producción tradicionales a otros nuevos basados en serus, en este caso, los autores se plantean consideraciones de diversa índole en relación con vuelta a las líneas de ensamblaje automatizadas en la industria del automóvil sueca.

Con este análisis, se pretende ofrecer al lector una reflexión de los motivos que sustentan la vuelta de los sistemas automatizados en este sector de la industria, y plantea si pueden existir otros factores que hayan impulsado dicho retorno.

Puesto que el volumen de la producción parece ser un factor determinante, se pretenden establecer los rangos de conveniencia de un tipo de sistema de producción y otro, empleándose índices que miden la flexibilidad, el tiempo de entrega estipulado con el cliente o los costes. También se tienen en consideración los aspectos relacionados con la sostenibilidad social.

Las tácticas mencionadas por los autores del artículo se enumeran en la *Tabla 9*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✗
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 9. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [29].

Como conclusión positiva respecto a los sistemas Seru Seisan, se extrae del artículo que se produce un incremento de la productividad de las horas/hombre, así como en la calidad de producto final la sostenibilidad social.

Is Japanese cell manufacturing a new system? A comparative study between Japanese cell manufacturing and cellular manufacturing [30].

El objetivo de este artículo es realizar un estudio comparativo entre la fabricación celular japonesa (JCM) y la fabricación celular (CM), poniéndose de manifiesto las grandes diferencias entre ambos sistemas en lo que se refiere a la implementación de los mismos y a su capacidad de adaptación a las fluctuaciones de la demanda.

Así, aunque existen características comunes en ambos sistemas, se establece que la fabricación celular se lleva a cabo a partir de sistemas de producción tipo taller, mientras que la fabricación celular japonesa se aplica a sistemas automatizados.

Del mismo modo, la fabricación celular japonesa ofrece mayor capacidad de adaptación a cambios bruscos en las condiciones del entorno, disminuyéndose de forma más notable el coste y tiempo de producción, y permitiendo que el incremento de habilidad de los trabajadores suponga una mejora en la calidad final del producto. Las tácticas mencionadas por los autores del artículo son las que se detallan en la *Tabla 10*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✓
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 10. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [30].

2.7.2.3 Modelo matemático

En este apartado se van a exponer y analizar los artículos más relevantes de la investigación de los sistemas Seru Seisan cuyo objetivo es la elaboración de un modelo matemático del problema a resolver a la hora de reconfigurar un sistema tradicional a uno formado por serus.

A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing [31].

En este artículo se realiza un análisis de las tareas a realizar por los trabajadores en la configuración de un sistema de fabricación celular a partir de una línea automatizada de montaje, incluyéndose el efecto de las necesidades de aprendizaje de los trabajadores.

Para ello, se llevan a cabo tres modelos matemáticos independientes: uno sobre las líneas automáticas de montaje, otro sobre la fabricación celular y un tercero sobre el empleo de ambos sistemas de forma combinada. En el modelado, se considera que la destreza de cada trabajador es variable, del mismo modo que se considera que sus necesidades de entrenamiento serán diferentes.

Las tácticas mencionadas por los autores son las que se recogen la *Tabla 11*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✓
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 11. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [31].

Las conclusiones extraídas de este artículo son que la conversión de los sistemas a Seru Seisan incrementa la motivación de los empleados, así como la capacidad de los mismos para aprender y adaptarse a cambios característicos de entornos dinámicos de mercado. Se reducen el tiempo de entrega y las necesidades de inventario, mientras que la productividad aumenta de manera drástica.

A mathematical model for converting conveyor assembly line to cellular manufacturing [32].

Los autores de este artículo ofrecen un modelo matemático con el que se pretende resolver el problema de la configuración del sistema de producción a uno Seru Seisan mediante la creación de células de trabajo independientes además del mantenimiento de una versión reducida de la línea automatizada de montaje.

Las variables de decisión determinan el número de células que deben formarse, la cantidad de trabajadores que serán asignados a cada célula y que, por el contrario, permanecerán en la línea automática reducida.

Las condiciones del ambiente consideradas son las más desfavorables posibles. Es decir, se considera un entorno de trabajo en el caso de mayor dificultad de adaptación del sistema, debido a aspectos tales como la existencia de demandas fluctuantes con tamaños de lotes inestables, así como variaciones en el rendimiento de los trabajadores según el puesto de trabajo y el producto al que han sido asignados.

Las principales ventajas arrojadas tras realizar simulaciones sobre el modelo matemático consisten en la reducción de los tiempos de producción totales, en gran medida los de instalación, y el rendimiento del sistema se ve incrementado.

En la *Tabla 12* se detallan las tácticas mencionadas por los autores de este artículo:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 12. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [32].

Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems [33].

El artículo aporta un modelado matemático para la configuración Seru Seisan en un sistema de producción a partir de una línea tradicional de montaje, que se resuelve mediante métodos numéricos.

Las tácticas a las que se hace referencia en este artículo se exponen en la *Tabla 13*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 13. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [33].

Las conclusiones obtenidas tras la simulación del modelo matemático planteado señalan que el rendimiento del proceso productivo se ve fuertemente incrementado cuanto más pequeño es el tamaño del lote de entrega a cliente. Igualmente, se deduce que la configuración de líneas automatizadas no debe adoptarse en aquellos sectores del mercado en los que la diversidad de los productos es elevada.

Otra conclusión es que cuando sólo se fabrica un tipo de producto, no se dan las mejoras de rendimiento esperadas que sí se obtienen frente a productos con alta variabilidad, por lo que en esos casos puede no ser rentable la conversión a Seru Seisan.

Finalmente, se menciona que el empleo de sistemas de producción híbridos en los que determinados productos son obtenidos a través de serus y otros mediante una línea de ensamblaje tradicional pueden ser beneficiosos. Esto podría ocurrir, por ejemplo, en aquellos casos en los que se requiera la fabricación masiva de determinados componentes o elementos de características constantes, pero, a su vez, los productos finales en que se incorporan sí tengan particularidades variables.

Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus [20].

Con el modelo matemático planteado en este artículo, se resuelve el problema de la reconfiguración del sistema a uno Seru Seisan decidiendo el número de serus que van a montarse y la cantidad de trabajadores que van a ser asignados a cada seru. El modelo matemático resultante es no lineal, y su función objetivo es la minimización del *makespan* total.

Otra característica que se establece en el mismo es que dentro de cada seru, el primer lote de piezas y materiales que se recibe es el primero que se utiliza para la elaboración de la unidad de producto. Es decir, se sigue un modo de funcionamiento FIFO en cada seru (*First In, First Out*).

Las tácticas empleadas por los autores son las que se muestran en la *Tabla 14*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 14. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [20].

Las principales conclusiones que se extraen de este artículo son que el sistema Seru Seisan representa una combinación entre la flexibilidad de los sistemas tipo taller y el alto grado de eficiencia característicos de las

líneas automatizadas empleadas en la producción en masa.

How to carry out assembly line cell conversion - A discussion based on factor analysis of system performance improvements [14].

Se propone un modelo matemático multiobjetivo en el que pretende minimizarse, por un lado, el tiempo total de producción, y, por otro lado, las horas de trabajo. Esta distinción de tiempos es debida a que el modelo está pensando para ser aplicado a un sistema híbrido en el que se tienen células de fabricación combinadas con una línea automatizada de montaje tradicional. El tiempo total de producción correspondería con el total requerido para la elaboración de los productos, mientras que las horas de trabajo totales harían referencia al tiempo que se necesita que los trabajadores formen parte de las actividades de producción.

Como resultado, se tiene un modelo matemático no lineal en el que se incorporan conceptos como los trabajadores con habilidades transversales, y se concluye que la estrategia a seguir para mejorar cada uno de los objetivos es diferente en cada caso:

1. Si se desea minimizar el tiempo total de producción, lo ideal es que se diseñe un menor número de células y los trabajadores de cada célula tengan unas capacidades aproximadamente del mismo nivel.
2. Si se desean minimizar las horas de trabajo totales, la solución es contraria, ya que se tiende a formar el mayor número de células posibles para que la carga de trabajo se realice en paralelo al mismo tiempo.

Las tácticas empleadas en este modelo matemático son las que se exponen en la *Tabla 15*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 15. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [14].

Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems [2].

El modelo matemático que se elabora en este artículo pretende resolver el problema del entrenamiento de los trabajadores y la asignación de los mismos a los serus cuando se reconfigura una línea de ensamblaje automatizada en un sistema de producción Seru Seisan. La resolución de este modelo matemático se lleva a cabo mediante un algoritmo heurístico diseñado por los autores del artículo.

Las tácticas empleadas en el caso de este artículo son las que se recogen en la *Tabla 16*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 16. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [2].

Se trata de un modelo no lineal en el que el objetivo primordial es la minimización de los costes en actividades de formación, si bien también existe la intención de obtener un sistema resultante lo más equilibrado posible con respecto al tiempo de trabajo de los empleados.

Las variables de asignación son, por tanto, las tareas de formación a realizar para cada trabajador y la asociación de los mismos con sus correspondientes serus.

Las principales conclusiones obtenidas a partir de este artículo son que la sustitución de las líneas automáticas por sistemas en serus mejora el tiempo de producción y fomenta un mejor ambiente de trabajo entre los empleados.

Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures [3].

El objetivo principal del modelo matemático que se desarrolla en este artículo es la incorporación del concepto de sostenibilidad medioambiental y económica al sistema de producción Seru Seisan. A raíz del incremento de la atención pública a los aspectos relacionados con la contaminación y el cambio climático, la sostenibilidad ambiental cobra peso en las diferentes empresas.

Para ello, se acoplan al modelado factores como las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera o el consumo energético asociado a los procesos productivos. Como resultado, se obtiene un modelo matemático no lineal multiobjetivo: por un lado, se pretende reducir el nivel de CO₂ y, por otro lado, el tiempo total de procesado, *makespan*, para toda la demanda requerida.

Debido a la no linealidad del modelo matemático resultante, para la resolución se emplea un algoritmo genético de clasificación no dominado II, y se adjuntan los resultados en el artículo.

Las tácticas tenidas en cuenta por los autores en este artículo se detallan en la *Tabla 17*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✗
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✗
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✗
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✓

Tabla 17. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [3].

Como conclusiones principales que extraer del artículo, se determina que la reconfiguración de sistemas tradicionales a otros basados en serus reduce el *makespan* a la vez que es capaz de incorporar la sostenibilidad ambiental al minimizar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, así como el consumo energético requerido durante el proceso de producción.

2.7.2.4 Simulaciones

Por último, en este apartado se analiza el artículo cuyo objetivo es exponer los resultados obtenidos a partir de simulaciones realizadas sobre un modelo para analizar diversos aspectos relacionados con la configuración de la producción Seru Seisan.

Converting assembly lines to assembly cells at sheet metal products: insights on performance improvements [34].

En este artículo se analiza el proceso de adaptación a un sistema de producción Seru Seisan partiendo de una línea de ensamblaje de la que se obtenían diferentes productos. Se pretende dividir esta producción en células independientes que funcionen en paralelo, tras lo cual se espera que se incremente el rendimiento de la producción.

Las tácticas mencionadas por el autor en el artículo se detallan en la *Tabla 18*:

Trabajadores con habilidades transversales (MWA)	✓
Conversión de línea automática tradicional a líneas Seru (LSC)	✓
Mejora de los equipos empleados para la producción (EQI)	✓
Filosofía de mejora continua (COI)	✗
Fomento de la cultura de aprendizaje (LCC)	✓
Estudio de la distribución (<i>layout</i>) óptimo para Seru Seisan (SLS)	✗
Optimización del sistema de entrega de producto a cliente (DSO)	✗

Tabla 18. Tácticas empleadas en la implementación de Seru Seisan [34].

Uno de los principales factores tenidos en cuenta por el autor es la necesidad de flexibilidad en el sistema, que justifica del mismo modo que el resto de los autores, ya que existe una gran variabilidad de la demanda

y un alto grado de personalización de producto en la actualidad. Esto se refleja en el requerimiento de que los lotes sean de volumen reducido.

El autor lleva a cabo una serie de simulaciones en las que explora el impacto que ejerce cada posible modificación en las condiciones de trabajo. Las conclusiones principales arrojadas por dichas simulaciones estipulan que las pequeñas líneas serú tienen un mayor rendimiento que las grandes automatizadas tradicionales a la hora de buscar la flexibilidad.

3 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN SERU SOSTENIBLE

3.1 Objetivo

En el presente apartado se procede a detallar el estudio realizado sobre la implementación del sistema de producción Seru Seisan aplicado a la reconfiguración de una línea tradicional de montaje en dos casos distintos: uno de prueba, en el que la cantidad de productos diferentes obtenidos del sistema es reducida, y otro al que llamamos real, en el que este número es mayor y acorde a lo que se puede encontrar en este tipo de sistemas de producción.

Con el objetivo de enfocar el análisis de los sistemas Seru Seisan desde el punto de vista de la sostenibilidad, este estudio se centra en aspectos relacionados con el consumo energético y las emisiones de CO₂ a la atmósfera durante el funcionamiento de la producción. Por ello, variables como el tiempo total de producción (*makespan*) o la contaminación derivada de la obtención de un determinado producto en un seru específico tomarán gran relevancia y serán lo que determine el resultado.

El modelo matemático que se toma como partida está basado en el que se planteó en el artículo de 2015 por Liu et al [3], y se detalla más adelante en el apartado *Modelo matemático original*. Los resultados ofrecidos en este artículo fueron obtenidos mediante la aplicación de algoritmo genético, mientras que en el presente proyecto se ha llevado a cabo la linealización de dicho modelo, que puede consultarse en el apartado *Linealización*, y su resolución mediante *software* de programación lineal.

3.2 Planteamiento

El problema objeto de estudio en este apartado es el caso de la reconfiguración de un sistema de producción tradicional a uno formado por serus, para los cuales se dispone de multitud de equipos de trabajo de distinta naturaleza con los que resulta posible realizar cada una de las tareas necesarias para la producción de todos los elementos.

La configuración de este sistema consiste en la división del periodo de funcionamiento de la planta de producción en diferentes etapas, una por cada producto que se pretende obtener. Estas etapas tienen lugar de manera secuencial, de forma que la elaboración de un determinado tipo de producto no comienza hasta que ha finalizado por completo la del producto anterior. Por tanto, existirán tantas etapas de producción como tipos de productos.

En una determinada etapa de funcionamiento, el producto correspondiente puede estar siendo obtenido mediante

diferentes serus que trabajan en paralelo. Es decir, que en cada etapa pueden existir varios serus funcionando a la vez, obteniéndose de cada uno de ellos el mismo producto.

Puesto que los procesos de fabricación de cada producto no tienen por qué ser iguales ni emplear los mismos equipos o materiales, el número de serus que trabajan en paralelo en cada una de las etapas puede ser distinto. Es decir, puede darse el caso de que para el producto 1, obtenido durante la etapa de producción 1, se empleen 2 serus, mientras que para el producto 2, que se obtiene en la etapa de producción 2, se utilicen 5 serus. Este funcionamiento se ha representado en la *Figura 5*.

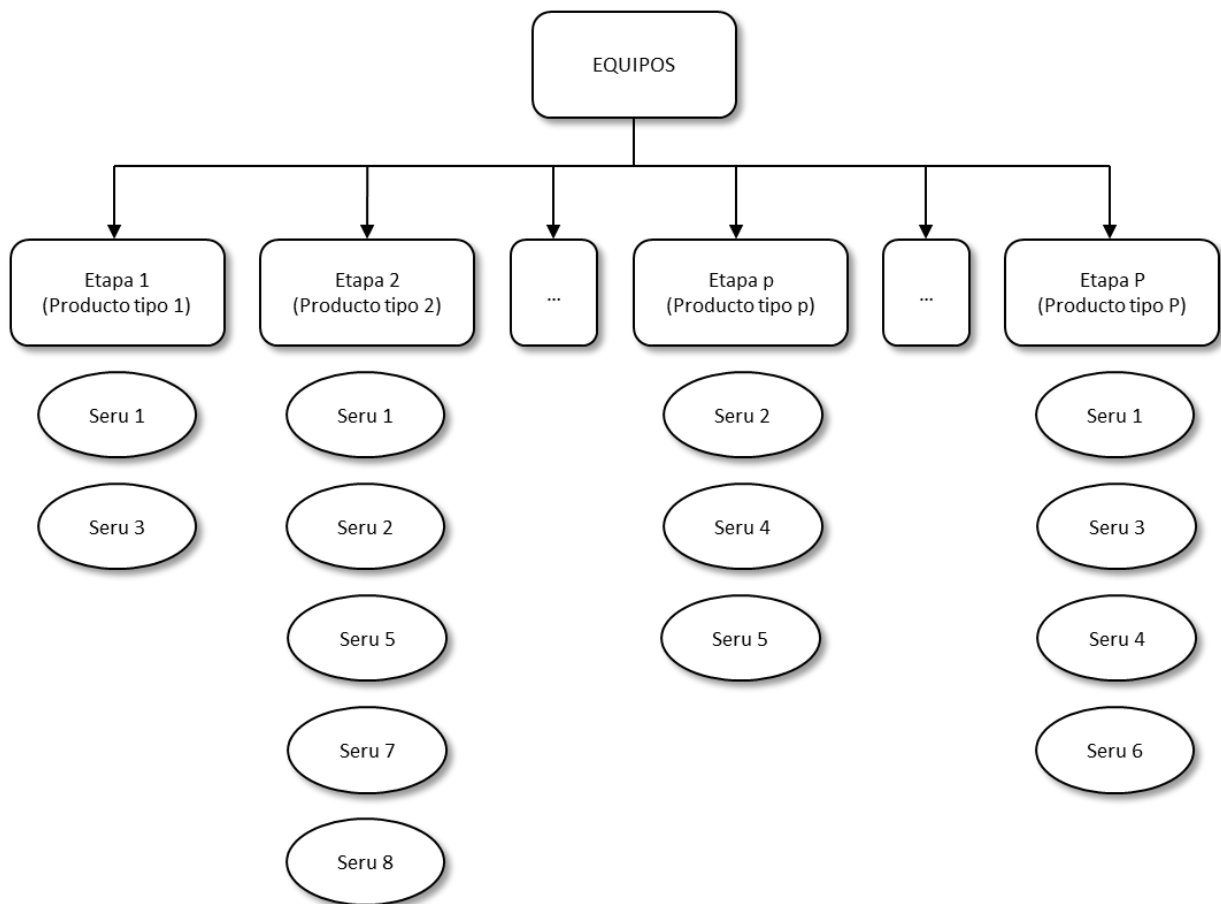


Figura 5. Esquema de funcionamiento de la configuración considerada en el estudio – Modelo básico.

La demanda total de cada uno de los productos será satisfecha llevándose a cabo su elaboración en paralelo mediante los serus asociados a dicho producto, y la porción de esta demanda que cada seru asume podrá ser diferente de un seru a otro.

Hay que tener en cuenta que no todos los serus son capaces de producir todos los tipos de productos. Es decir, que cada producto que se pretende fabricar tiene asociada una lista de serus seleccionables que permiten su elaboración, por lo que esto deberá ser tenido en cuenta por el modelo a la hora de su resolución.

Del mismo modo, cada configuración de seru implica un determinado consumo de energía y nivel de

contaminación distinto para cada producto, hecho que condicionará la asociación óptima seru-producto al tener como objetivo la optimización de la sostenibilidad del sistema.

Además del impacto en el medio ambiente, también se incluye en este estudio el rendimiento económico del sistema de producción. Esto se lleva a cabo mediante la inclusión del *makespan*, tiempo requerido para que termine el procesamiento de los productos, ya que su valor es un indicador de los costes de producción. Puesto que el procesado tiene lugar de manera secuencial, un producto tras otro, el *makespan* equivaldrá a la suma de los tiempos máximos empleados en cada etapa.

Así, el problema que se plantea es la asignación de productos a distintos serus de fabricación, teniendo en cuenta que dichos serus sean seleccionables para ese producto, tratando de minimizar el tiempo de producción y las emisiones de dióxido de carbono y de manera que se satisfaga la demanda mediante la mejor combinación posible de serus para cada producto.

3.3 Datos de partida del modelo básico

En este apartado se especifican los datos de partida empleados en la resolución del problema anteriormente descrito. Se han considerado dos casos diferentes. Por un lado, se tiene un primer caso de prueba, cuyo reducido volumen de datos ha permitido agilizar el estudio del modelo de forma tanto manual como computacional. Una vez conseguido esto, se ha aplicado el resultado a un caso más grande, en el que el tamaño de los datos se corresponde con una situación real.

3.3.1 Caso de prueba

En este primer caso de prueba, el número total de serus configurables va a ser de 7. Por otro lado, se van a fabricar un total 4 productos diferentes y el tiempo máximo de finalización para la fabricación de toda la demanda de los 4 productos son 800 horas.

Con respecto a la contaminación medioambiental, se ha considerado que la energía empleada en el proceso de producción implica una emisión de CO₂ de 0,785 kg por cada kWh de consumo. Estos datos de partida quedan recogidos en la *Tabla 19*:

<i>N.º Serus</i>	7
<i>N.º Productos</i>	4
<i>Deadline (h)</i>	800
<i>Coef. Emisión (kg CO₂e/kWh)</i>	0,785

Tabla 19. Datos iniciales – Modelo básico – Caso de prueba [3].

Del mismo modo, puesto que cada producto sólo puede ser fabricado en un determinado número de serus, resulta necesario definir un parámetro, denominado “Serus seleccionables”, que recoja esta información. Así mismo, cada producto tiene una demanda específica asociada, de manera que la cantidad de productos a fabricar de un tipo es distinta a la del resto. También se establece un límite de emisiones de CO₂ particular para cada etapa de producción.

En la *Tabla 20* se detallan los valores que toman los datos anteriores:

<i>Producto</i>	<i>Serus seleccionables</i>	<i>Demanda (uds)</i>	<i>Límite CO₂ (kg CO₂e)</i>
1	2	20	100
2	7	70	750
3	5	40	200
4	6	30	150

Tabla 20. Serus seleccionables, demanda y límite CO₂ – Modelo básico – Caso de prueba [3].

La fabricación de un determinado producto en un seru no tiene por qué emplear el mismo tiempo que en el caso de obtenerse mediante un seru distinto. Es decir, el producto 1, por ejemplo, requiere una hora de procesado en el seru 1. Sin embargo, de fabricarse en el seru 2 necesitaría 10 horas. Es un ejemplo representativo de que la asociación entre el seru 1 y el producto 1 tiene un efecto muy positivo en la reducción del *makespan*.

A continuación, en la *Tabla 21*, se muestra el tiempo de procesado en horas que cada uno de los productos requeriría en caso de asociarse a cada seru. Los casos marcados con una barra “/” indican que el seru no es seleccionable para el correspondiente tipo de producto.

<i>Producto</i>	<i>Seru 1</i>	<i>Seru 2</i>	<i>Seru 3</i>	<i>Seru 4</i>	<i>Seru 5</i>	<i>Seru 6</i>	<i>Seru 7</i>
1	1	10	/	/	/	/	/
2	3	8	2	9	8	4	9
3	1	2	7	6	9	/	/
4	9	8	2	2	10	6	/

Tabla 21. Tiempo de procesado (h) – Modelo básico – Caso de prueba [3].

Por otro lado, debido a las diferencias existentes entre el equipo y las herramientas que forman parte de cada uno de los serus, así como de los procesos seguidos en ellos, el consumo de energía que tiene lugar debido a la elaboración de una unidad de producto en un seru es diferente al consumo que supone en otro.

De esta manera, la optimización del consumo de energía, y por ende de las emisiones, estará fuertemente condicionada por las diferencias existentes entre el gasto energético que la obtención de cada producto ocasiona en cada seru.

En la *Tabla 22* se muestra el consumo energético en kWh que una unidad de producto supone en cada sero. Nuevamente se han marcado con una barra los casos en los que el sero no es seleccionable para ese producto.

<i>Producto</i>	<i>Seru 1</i>	<i>Seru 2</i>	<i>Seru 3</i>	<i>Seru 4</i>	<i>Seru 5</i>	<i>Seru 6</i>	<i>Seru 7</i>
1	9	2	/	/	/	/	/
2	15	2	10	2	3	6	1
3	9	8	3	2	2	/	/
4	1	2	9	7	1	5	/

Tabla 22. Consumo de energía (kWh) – Modelo básico – Caso de prueba [3].

3.3.2 Caso real

De manera totalmente análoga a lo expuesto en el apartado anterior, se detallan a continuación los datos referentes al caso real.

En la *Tabla 23* se recogen los datos iniciales correspondientes a este escenario:

<i>N.º Serus</i>	6
<i>N.º Productos</i>	10
<i>Deadline (h)</i>	1500
<i>Coef. Emisión (kg CO₂e/kWh)</i>	0,785

Tabla 23. Datos iniciales – Modelo básico – Caso real [3].

En la *Tabla 24* se muestran los seros seleccionables, la demanda en unidades y el límite de emisiones establecido para cada producto que se fabrica:

<i>Producto</i>	<i>Seros seleccionables</i>	<i>Demanda (uds)</i>	<i>Límite CO₂ (kg CO₂e)</i>
1	2	20	130
2	5	70	600
3	5	40	230
4	6	30	200
5	6	20	130
6	5	30	360
7	2	20	150
8	3	30	231
9	6	40	395
10	2	20	145

Tabla 24. Seros seleccionables, demanda y límite CO₂ – Modelo básico – Caso real [3].

En la *Tabla 25* se especifica el tiempo de procesado en horas para cada unidad de producto fabricada en un determinado sero:

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	1	11	/	/	/	/
2	1	9	3	8	8	/
3	2	3	8	5	10	/
4	9	7	4	3	10	4
5	7	8	3	2	10	7
6	1	9	2	9	8	/
7	1	8	/	/	/	/
8	2	11	2	/	/	/
9	11	9	1	3	9	2
10	3	13	/	/	/	/

Tabla 25. Tiempo de procesado (h) – Modelo básico – Caso real [3].

Por último, en la *Tabla 26* se muestran los valores de consumo energético que supone la elaboración de cada producto en cada sero seleccionable:

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	8	2	/	/	/	/
2	15	2	8	2	3	/
3	9	7	2	4	1	/
4	3	4	10	11	1	8
5	2	3	7	9	1	3
6	15	2	11	2	3	/
7	9	2	/	/	/	/
8	10	1	8	/	/	/
9	1	2	13	8	3	8
10	9	1	/	/	/	/

Tabla 26. Consumo de energía (kWh) – Modelo básico – Caso real [3].

3.4 Hipótesis de partida

Dada la complejidad del problema propuesto, en este apartado se especifican cuáles son las hipótesis de partida que toma el modelo desarrollado por Liu et al [3] para posibilitar su modelización matemática, así como para facilitar su resolución.

1. No existen movimientos de producto entre serus. Es decir, si se está fabricando un tipo de producto en varios serus que funcionan simultáneamente en paralelo, en ningún momento existe intercambio de piezas, materiales, equipos o subproductos entre los serus en funcionamiento. Cada unidad de producto es completada, desde el inicio hasta el final, en un mismo sero.
2. El tiempo de procesado de un determinado producto en un sero es constante. Es decir, que el tiempo total de producción de una determinada cantidad de unidades de un producto en un sero será el tiempo estimado para una unidad multiplicado por el número de unidades. No se consideran fluctuaciones en

este tiempo.

3. No se considera que exista tiempo de reconfiguración entre la fabricación de un producto y la del siguiente, ya que la producción serú es altamente flexible. Por tanto, se asume que una vez terminada la fabricación de un determinado producto, el cambio que se lleva a cabo para preparar los serus correspondientes al siguiente producto es 0.
4. El consumo de energía asociado a la elaboración de un tipo de producto en un serú determinado es una constante y es conocido.
5. Sólo un tipo de producto es elaborado durante una misma etapa de funcionamiento. Todos los serus seleccionados para la fabricación de ese producto trabajan en paralelo hasta la finalización de la etapa, que es cuando tiene lugar la reconfiguración para montar los serus asociados al siguiente producto.
6. Existe al menos un serú seleccionable para cada producto.
7. No se tienen en cuenta posibles averías en los serus.
8. La demanda de cada tipo de producto es una cantidad conocida, y va a ser el número de unidades obtenidas de dicho producto. Es decir, la adquisición y gestión de inventarios de materias y productos no está considerada en este modelo.
9. El coste de reconfigurar los serus entre una etapa y la siguiente se considera nulo, por lo que en términos de costes, se puede cambiar entre serus tantas veces como se desee, es decir, no existe ninguna ventaja al emplear el mismo serú en una etapa y la siguiente.
10. La fecha límite requerida para terminar el procesado de todas las unidades demandadas es lo bastante tarde como para hacer que esto sea posible.

3.5 Variables implicadas

Antes de presentar el modelo matemático desarrollado por Liu et al [3], conviene definir los parámetros y variables empleados en el mismo para tener claro el significado de cada una de las ecuaciones que lo componen.

- Parámetros disponibles de partida:
 - P : número de tipos de producto.

- S_p : número total de serus seleccionables del tipo de producto p .
 - Q_p : demanda de unidades del producto tipo p .
 - t_{ps} : tiempo de procesado del producto tipo p en el seru s . Tiene unidades de $horas/unidad$
 - c_{ps} : energía consumida por unidad del producto tipo p fabricada en el seru s . Tiene unidades de $kWh/unidad$
 - E_p : límite superior de emisión de dióxido de carbono que se permite para el procesado de una unidad de producto tipo p . Tiene unidades de $kgCO_2e/unidad$
 - DT : tiempo máximo para completar la producción de todas las unidades demandadas de todos los productos. Tiene unidades de horas.
 - ξ_{ec} : coeficiente de emisión de CO_2 relativo al consumo de electricidad. Es una constante de valor 0,785 y sus unidades son de $kgCO_2e/kWh$
- Conjunto de índices:
 - p : índice que recorre los tipos de producto. Toma valores desde 1 hasta P .
 - s : índice que recorre los serus. Toma valores desde 1 hasta S_p .
- Variables intermedias:
 - T_p : tiempo en que comienza el procesado del producto tipo p . Esta variable marcará el cambio entre una etapa y la siguiente. Tiene unidades de horas.
- Variables de decisión:
 - X_{ps} : variable que indica si el producto tipo p ha sido asignado al seru s . Es una variable binaria cuyos valores indican:
 - 1: el producto tipo p ha sido asignado al seru s .

- 0: el producto tipo p no ha sido asignado al sero s .
- Q_{ps} : cantidad de unidades del producto tipo p que se han asignado al sero s .

3.6 Modelo matemático original

A continuación, se muestra el modelo matemático original planteado por Liu et al [3], que como puede comprobarse a simple vista, es no lineal, razón por la que posteriormente se ha llevado a cabo la elaboración de un modelo lineal equivalente.

Este modelo contiene dos funciones objetivo que son independientes, lo que constituye una de las razones para llevar a cabo su resolución mediante algoritmo genético. La primera de estas funciones representa el tiempo total de producción, mientras que la segunda hace referencia a las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El modelo matemático que recoge el problema planteado y descrito en los apartados anteriores es el siguiente:

Minimizar:

$$f_1 = \sum_{p=1}^P \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^{S_p} X_{ps} Q_{ps} c_{ps} \xi_{ec} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$1 \leq \sum_{s=1}^{S_p} X_{ps} \leq S_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} X_{ps} Q_{ps} = Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} X_{ps} Q_{ps} c_{ps} \xi_{ec} \leq E_p Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^{p'-1} \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \leq T_{p'} \quad \forall p' \in \{2, 3, \dots, P\} \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P \max_{s \in \{1,2,\dots,S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \leq DT \quad (7)$$

$$X_{ps} \in \{0,1\} \quad \forall p \in \{1,2,\dots,P\} \quad \forall s \in \{1,2,\dots,S_p\} \quad (8)$$

$$Q_{ps} \in \mathbb{Z} \quad \forall p \in \{1,2,\dots,P\} \quad \forall s \in \{1,2,\dots,S_p\} \quad (9)$$

$$T_p \geq 0 \quad \forall p \in \{1,2,\dots,P\} \quad (10)$$

A continuación se describe de manera individual el significado de cada una de las ecuaciones que componen el modelo:

- **Ecuación (1).** Se trata de una función objetivo. Representa el *makespan* del sistema de producción Seru tras procesar la demanda total de todos los tipos de producto. Es un parámetro a minimizar que implica un mejor rendimiento económico de la factoría.
- **Ecuación (2).** Es una segunda función objetivo que se pretende minimizar. Representa la emisión de dióxido de carbono causada por el consumo de energía asociado a la fabricación del total de la demanda de todos los productos en cada uno de los serus en los que han sido asociados.
- **Ecuación (3).** Asegura que el número de serus seleccionados para cada tipo de producto es como mínimo 1, y nunca superior al número de serus seleccionables para ese tipo de producto.
- **Ecuación (4).** Impone que se va a satisfacer la demanda de cada tipo de producto. Es decir, que la suma de las unidades fabricadas de un determinado producto en todos los serus que le han sido asignados será igual a la demanda de dicho producto.
- **Ecuación (5).** Garantiza que las emisiones de CO₂ que van a tener lugar en cada etapa de funcionamiento no superarán el límite establecido para el procesado de cada tipo de producto.
- **Ecuación (6).** Sirve para estipular que la fabricación de un determinado producto no puede dar comienzo hasta que haya finalizado por completo la del producto anterior.
- **Ecuación (7).** Con esta restricción se obliga a que el *makespan* del sistema de producción no supere el tiempo límite que ha sido establecido.
- **Ecuación (8).** Se impone que la variable de decisión X_{ps} sólo puede valer 0 ó 1.

- **Ecuación (9).** La cantidad de productos fabricados en un único sero es un número entero. Es decir, que no se puede realizar una unidad de producto a medias entre varios seros.
- **Ecuación (10).** El tiempo en el que comienza el procesado de cada tipo de producto tiene que ser un valor positivo, puesto que es una medida de tiempo.

3.7 Linealización

En este apartado se describe el análisis realizado sobre el modelo anterior con el objetivo de obtener un equivalente lineal del mismo.

En primer lugar, teniendo en cuenta el significado de las dos variables de decisión, X_{ps} y Q_{ps} , puede establecerse de manera sencilla una relación entre ambas. Puesto que X_{ps} representa si el producto p ha sido asignado al sero s , y Q_{ps} indica la cantidad de unidades de producto p que serán obtenidas mediante el sero s , puede establecerse que, si la cantidad de unidades Q_{ps} es 0, la variable de decisión X_{ps} también lo es. Del mismo modo, puede determinarse que si el número de unidades Q_{ps} estipulado es mayor que 0, esto implica necesariamente que la variable de decisión X_{ps} valga 1.

Matemáticamente, puede expresarse del siguiente modo:

$$Q_{ps} = 0 \rightarrow X_{ps} = 0$$

$$Q_{ps} > 0 \rightarrow X_{ps} = 1$$

Esto implica que el producto $X_{ps}Q_{ps}$ que aparece constantemente en las funciones objetivo y en las restricciones puede ser sustituido por Q_{ps} , añadiendo la siguiente restricción matemática que impone los conceptos comentados anteriormente:

$$X_{ps} \leq Q_{ps} \leq Q_p X_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\}$$

Por otro lado, se puede definir el tiempo de cada producto que aparece en la primera función objetivo del siguiente modo:

$$z_p = \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\}$$

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado sobre el producto $X_{ps}Q_{ps}$, quedaría:

$$z_p = \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{t_{ps} Q_{ps}\}$$

Con esto, la primera función objetivo puede pasar a formularse como se indica a continuación:

$$f_1 = \sum_{p=1}^P \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \rightarrow \sum_{p=1}^P \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{t_{ps} Q_{ps}\} \rightarrow f_1 = \sum_{p=1}^P z_p$$

Si se tiene en cuenta que z_p es el máximo valor posible del producto $t_{ps} Q_{ps}$, entonces siempre se va a cumplir que es mayor o igual que este producto, y por tanto esto se puede imponer como:

$$z_p \geq t_{ps} Q_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\}$$

Por lo tanto, la variable intermedia que se usaba previamente en el modelo de Liu, T_p , desaparece del modelo que se va a emplear, empleándose para medir los tiempos la variable z_p .

Aunque el proceso de linealización en sí habría finalizado con este último añadido, se va a analizar el resto del modelo con el objetivo de buscar posibles simplificaciones y redundancias en el mismo que faciliten la resolución matemática.

En base a este fin, se procede a analizar la restricción formulada en la ecuación (3):

$$1 \leq \sum_{s=1}^{S_p} X_{ps} \leq S_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$$

Esta restricción es redundante con otros conceptos ya establecidos en el modelo matemático. Por un lado, teniendo que cumplirse la demanda de cada producto, y estando esto garantizado mediante la restricción (4), siempre va a haber como mínimo un sero asociado a cada producto p , por lo que X_{ps} será siempre mayor que 1. Por otro lado, dado que siempre evaluamos s en el resto de las restricciones considerando únicamente las s pertenecientes a S_p , no hace falta imponer que haya menos asociaciones que S_p , porque matemáticamente no puede haberlas. Por tanto, esta restricción la vamos a eliminar, por innecesaria.

Igualmente, se ha estudiado la restricción formulada mediante la ecuación (6):

$$\sum_{p=1}^{p'-1} \max_{s \in \{1, 2, \dots, S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \leq T_{p'} \quad \forall p' \in \{2, 3, \dots, P\}$$

Sustituyendo tal como se ha definido antes, quedaría:

$$\sum_{p=1}^{p'-1} \max_{s \in \{1,2,\dots,S_p\}} \{X_{ps} t_{ps} Q_{ps}\} \leq T_{p'} \rightarrow \sum_{p=1}^{p'-1} \max_{s \in \{1,2,\dots,S_p\}} \{t_{ps} Q_{ps}\} \leq T_{p'} \rightarrow \sum_{p=1}^{p'-1} z_p \leq T_{p'}$$

Es decir, que la restricción queda expresada de la siguiente forma:

$$\sum_{p=1}^{p'-1} z_p \leq T_{p'} \quad \forall p' \in \{2, 3, \dots, P\}$$

El significado de esta restricción es únicamente que el último producto elaborado ha tenido que terminar antes de que empiece a producirse el siguiente. Sin embargo, en el modelo estamos contabilizando el tiempo que tarda en finalizarse la demanda de cada producto de manera independiente, y el tiempo total de producción se obtiene como la suma de todos esos tiempos individuales, definidos como z_p .

Por tanto, esta restricción tampoco aporta nada a la resolución del modelo en sí. Dado que el tiempo total nunca va a ser menos que la suma de todos, nunca va a empezar a fabricarse un producto antes de que termine el anterior. El único valor que nos aporta es a la hora de representar en una línea temporal el momento en el que cada uno de los productos comienza a fabricarse.

Con todo lo expuesto anteriormente, el modelo matemático linealizado que se obtiene es el que se muestra a continuación:

Minimizar:

$$f_1 = \sum_{p=1}^P z_p \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Q_{ps} c_{ps} \xi_{ec} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$X_{ps} \leq Q_{ps} \leq Q_p X_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (3)$$

$$z_p \geq t_{ps} Q_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} Q_{ps} = Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} Q_{ps} c_{ps} \xi_{ec} \leq E_p Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^P z_p \leq DT \quad (7)$$

$$X_{ps} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (8)$$

$$Q_{ps} \in \mathbb{Z} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (9)$$

$$z_p \geq 0 \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (10)$$

4 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN AMPLIADO – INCLUSIÓN DE COSTE TOTAL

4.1 Objetivo

Con el objetivo de introducir información económica en el modelo descrito en el apartado anterior, *Problema de optimización de producción Seru sostenible*, se ha realizado un estudio para llevar a cabo la incorporación de los parámetros relativos a los costes en el problema original. De esta forma, se puede desarrollar un nuevo modelo matemático que permite minimizar el coste total asociado a la configuración de la producción en serus, a la vez que se siguen teniendo en cuenta los aspectos fundamentales de la sostenibilidad.

Los costes que se han introducido en este modelo son los asociados al consumo de energía durante el tiempo de funcionamiento, al tiempo de uso de las instalaciones, a la necesidad de llevar a cabo una reconfiguración de serus entre la fabricación de un producto y la del siguiente, y al de entrenamiento de los trabajadores asociados a cada uno de los serus y productos, que requerirán una formación específica que les permita realizar las labores asociadas a la obtención de un determinado producto en el seru al que han sido asignados. Algunos de estos costes son utilizados por otros autores en la optimización de sistemas seru, como por ejemplo los costes de entrenamiento, en el caso de Liu et al [2] o Ying et al [22].

La aplicación de este modelo se realizará nuevamente en dos escenarios diferentes, el de prueba y el real, que se distinguen entre sí ya no sólo en el número de productos y serus posibles, sino también en la cantidad de operarios que formarán parte del sistema de producción.

Puesto que no desea perderse el concepto de sostenibilidad en el modelado, se incorporan restricciones relativas a emisiones de dióxido de carbono, a la vez que se pretende reducir el consumo energético lo máximo posible, englobado en el nuevo marco que establece el objetivo de la minimización de los costes de configuración y producción.

4.2 Planteamiento

El problema que se pretende solucionar consiste nuevamente en la reconfiguración de un sistema de producción convencional, con sus líneas de montaje y procesos automatizados, en un sistema Seru Seisan, con el añadido de que aporta como solución la distribución óptima de trabajadores por serus además de la cantidad de unidades de producto que realiza cada seru. De esta forma, no sólo los equipos y la maquinaria disponibles se asignan a un seru determinado para cumplir una función específica en la obtención de cada producto que emplea dicho seru, sino que además se elige cuál es el trabajador idóneo para trabajar en cada seru.

Al igual que ocurría con el modelo anterior, el tiempo de funcionamiento de la fábrica se divide de manera independiente en etapas, una correspondiente a cada tipo de producto, y de manera que nunca tiene lugar la fabricación simultánea de dos o más productos. Esto nos lleva a tener el mismo número de etapas que de productos quieren fabricarse.

Cada tipo de producto puede obtenerse a la vez empleando serus distintos que operan al mismo tiempo, pero sin relación entre unos y otros, por lo que puede darse un resultado de configuración en el que se esté obteniendo un tipo de producto y estén funcionando todos sus serus seleccionables, varios, o bien sólo uno de ellos. El consumo de energía y la contaminación son particulares para cada combinación seru-producto, lo que implica que algunas de estas combinaciones sean descartadas si no cumplen los requisitos impuestos relativos a las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

La demanda establecida para cada producto se obtiene empleando un único seru o bien serus en paralelo que producen la cantidad exacta requerida, pudiendo ser distinto el número unidades que fabrica cada uno. Como cada seru dispone de una combinación de equipos y recursos diferente, no todos ellos serán elegibles para todos los productos, sino que se especificarán una serie de combinaciones seru-producto posibles, y esto se tendrá en cuenta como restricción a la hora de obtener la solución.

En este planteamiento, los serus empleados se han tomado de tipo Yatai, que fueron explicados en el apartado Tipologías de Seru Seisan. Esto significa que cuando un operario es asignado a un seru para la fabricación de un determinado producto, él es el único empleado que está dedicado a la obtención de dicho producto mediante ese seru. Puede haber otros trabajadores asignados a otros serus que también estén dedicados a ese mismo producto, pero siempre trabajando en paralelo en un seru independiente y sin interferir ninguno de ellos en el trabajo de los otros.

Una vez finalizada la etapa correspondiente al producto que se estaba obteniendo, se lleva a cabo una reconfiguración de serus y trabajadores, de manera que los serus requeridos para la fabricación del siguiente producto son configurados. Esto lleva asociados unos determinados costes de set-up, que dependerán tanto del producto que se pretende obtener como del seru que se va a instalar.

Del mismo modo, los trabajadores son reasignados a los nuevos serus que se van a emplear en la siguiente etapa, por lo que puede darse el caso de que un trabajador que estaba produciendo en un seru determinado pase a estar asociado a otro seru totalmente distinto en el producto siguiente. También puede darse el caso de que dicho trabajador no sea seleccionado para ningún seru en la nueva etapa de funcionamiento. En la *Figura 6* se muestra de manera esquemática el funcionamiento de este sistema aplicado al modelo ampliado que incluye a los trabajadores:

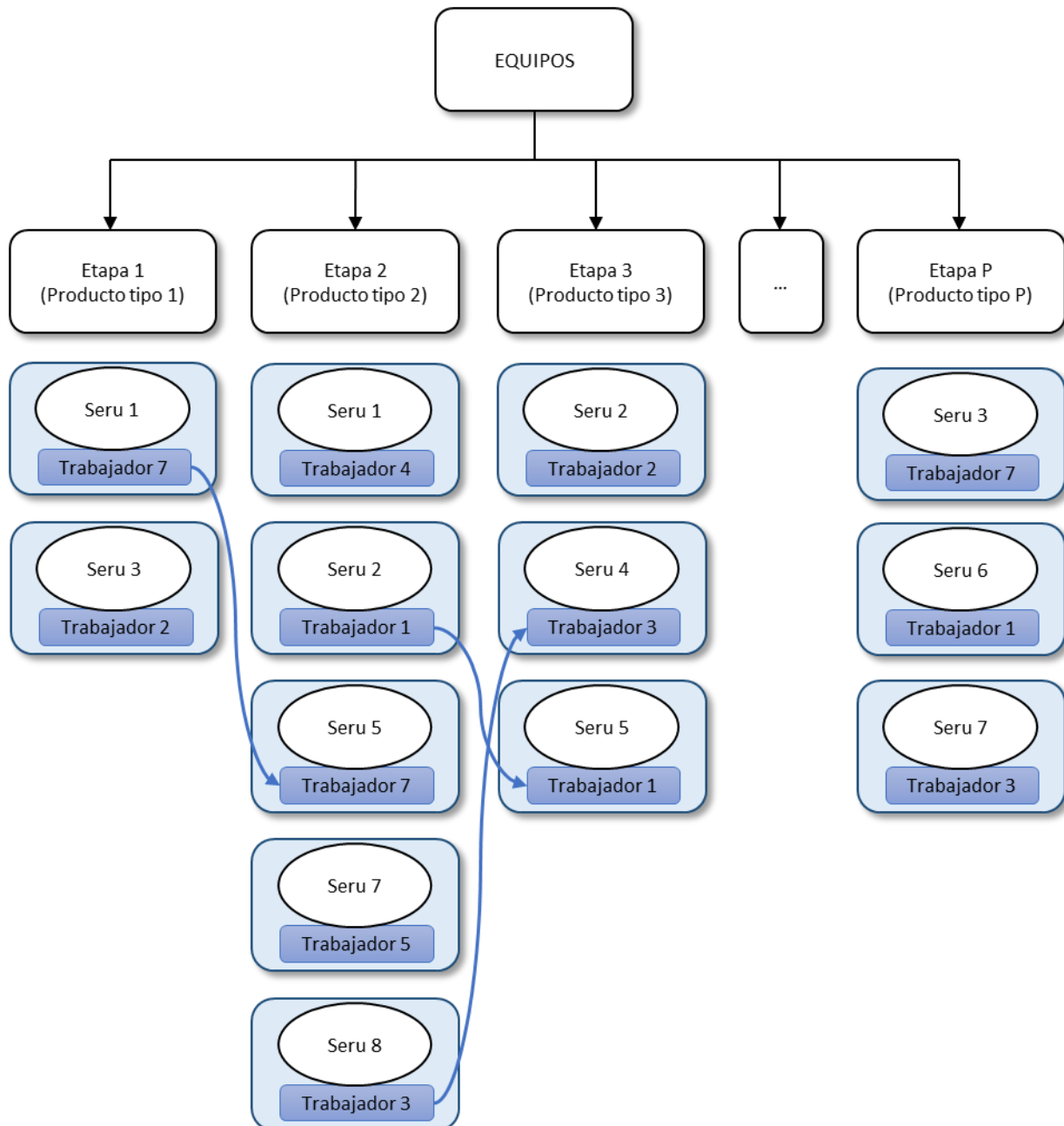


Figura 6. Esquema de funcionamiento de la configuración considerada en el estudio – Modelo ampliado.

Se trata por tanto de un problema en el que se resuelven tres asignaciones distintas bajo el objetivo común de minimizar los costes. Estas asignaciones son las que se detallan a continuación:

- Serus que participarán en cada producto.
- Cantidad de unidades de producto que se obtienen de cada seru seleccionado para satisfacer la demanda de manera exacta.
- Trabajador asociado a cada seru en cada etapa.

Además de estas asignaciones, el concepto de sostenibilidad no se pierde de vista en ningún momento, al incluirse la emisión de dióxido de carbono como un factor limitante que condiciona el resultado final de las mismas.

4.3 Datos de partida del modelo ampliado

Se detallan a continuación los diferentes datos utilizados como partida para obtener la solución al problema planteado anteriormente. Al igual que se hizo en el modelo anterior, se ha resuelto el problema aplicado a dos escenarios diferentes, atendiendo al número de productos y serus posibles, así como a la cantidad de trabajadores disponibles para hacer frente a las labores de producción.

La razón de esta separación de escenarios radica en que la disponibilidad de un caso pequeño y manejable facilita la profundización en el estudio del problema planteado sin necesidad de recurrir a la programación, permitiendo analizar de manera inicial las implicaciones de cada uno de los datos y el entendimiento de su importancia, favoreciendo una visión global de la situación.

4.3.1 Caso de prueba

Este primer caso de prueba comparte numerosos datos de partida con el planteado en el modelo anterior, en el apartado *Caso de prueba*. Se dispone de una cantidad de 7 serus posibles, cuya finalidad es la elaboración de 4 productos distintos, para lo que se impone nuevamente un *deadline* de 800 horas de producción. El número de trabajadores que se van a repartir las tareas es 4 y el coeficiente con el que medimos el volumen de contaminación por CO₂ continúa siendo de 0,785 kg por cada kWh de consumo.

El coste por uso de la instalación se ha establecido en 0,7 u.m./h, mientras que el valor del coste de la energía se ha elegido muy superior al real con la intención de penalizar aquellas soluciones que puedan minimizar el coste en términos de entrenamiento pero que impliquen un alto consumo energético, hecho con el que se pretende mantener presente todo el tiempo el concepto de sostenibilidad.

Estos datos de partida quedan recogidos en la *Tabla 27*:

<i>N.º Serus</i>	7
<i>N.º Productos</i>	4
<i>Deadline (h)</i>	800
<i>Coef. Emisión (kg CO₂e/kWh)</i>	0,785
<i>N.º Trabajadores</i>	4
<i>Coste energía (con penalización por consumo) (u.m./kWh)</i>	0,217
<i>Coste instalación (u.m./h)</i>	0,700

Tabla 27. Datos iniciales – Modelo ampliado – Caso de prueba.

En la *Tabla 28* se presentan los valores de los serus seleccionables para cada tipo de producto, la demanda que se debe satisfacer de cada uno de ellos, y el límite de emisiones permitido en su producción. Esta información ya la tomábamos para la aplicación del modelo básico, pero añadimos un nuevo parámetro que irá relacionado con una de las restricciones del modelo. Se trata del límite de *makespan* permitido para cada producto, que impone que la obtención del total de la demanda de un producto no puede exceder un tiempo determinado.

<i>Producto</i>	<i>Serus seleccionables</i>	<i>Demanda (uds)</i>	<i>Límite CO₂ (kg CO₂e)</i>	<i>Makespan (h)</i>
1	2	20	100	150
2	7	70	750	160
3	5	40	200	90
4	6	30	150	110

Tabla 28. Serus seleccionables, demanda, límite CO₂ y de makespan – Modelo ampliado – Caso de prueba.

Al igual que se tenía en el caso de la aplicación del modelo básico, el tiempo de procesado que un producto requiere en un determinado seru no tiene por qué coincidir con el que necesitaría en el caso de ser fabricado en otro seru, dado que los equipos y los medios disponibles en cada seru son diferentes y las tareas específicas requeridas por un producto pueden hacerse de modo mucho más eficiente en un seru que en otro.

Por esta razón, se recoge el tiempo de procesado de los productos que se van a fabricar en cada uno de los serus seleccionables para ello en la *Tabla 29*. Aquellas combinaciones seru-producto señaladas con una barra “/” indican la imposibilidad de obtener ese producto mediante ese seru.

<i>Producto</i>	<i>Seru 1</i>	<i>Seru 2</i>	<i>Seru 3</i>	<i>Seru 4</i>	<i>Seru 5</i>	<i>Seru 6</i>	<i>Seru 7</i>
1	1	10	/	/	/	/	/
2	3	8	2	9	8	4	9
3	1	2	7	6	9	/	/
4	9	8	2	2	10	6	/

Tabla 29. Tiempo de procesado (h) – Modelo ampliado – Caso de prueba.

Por motivos análogos a los expresados en el caso del tiempo de procesado, el consumo energético también vuelve a ser dependiente de la combinación seru-producto elegida. Esta información será muy relevante en la solución que se obtenga finalmente una vez hayamos optimizado el modelo, dado que el coste por consumo de energía se ha penalizado significativamente con el objetivo de dar prioridad a aquellas soluciones que más lo reducen.

En la *Tabla 30* puede consultarse los kWh de energía consumida que emplea la fabricación de una unidad de producto en cada uno de los serus en los que es posible obtenerlo, señalando nuevamente con una barra “/” los casos que no están permitidos:

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6	Seru 7
1	9	2	/	/	/	/	/
2	15	2	10	2	3	6	1
3	9	8	3	2	2	/	/
4	1	2	9	7	1	5	/

Tabla 30. Consumo de energía (kWh) – Modelo ampliado – Caso de prueba.

Un tipo de dato del que no se disponía en el modelo anterior son los costes de entrenamiento de los trabajadores. Representan cuánto cuesta la inversión a realizar con el objetivo de formar a un trabajador en la obtención de un producto mediante el empleo de los recursos disponibles en un determinado sero. Estos costes dependerán de las habilidades del propio trabajador, así como de su experiencia anterior al proceso de reconfiguración de la planta.

De ese modo, un trabajador que ya ha formado parte de procesos productivos en los que empleaba los mismos recursos de lo que tendría que hacer en el caso de trabajar en un sero para un producto, tendrá un coste de entrenamiento muy bajo, mientras que, si se trata de tareas que son completamente nuevas para él, el coste asociado a la formación del trabajador será desorbitado.

Así, se condiciona la distribución final obtenida de trabajadores según sero y producto, de manera que se busca siempre minimizar el coste de entrenamiento situando a trabajadores en combinaciones sero-producto en las que la formación requerida para ellos sea la menor posible.

En la *Tabla 31* se muestran los costes de entrenamiento para este caso de prueba. Los casos marcados con una barra “/” indican que ese trabajador no puede ser asignado a ese sero.

Trabajador	Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6	Seru 7
1	1	0	/	44	64	43	84	87,5
1	2	71,5	/	78	68,5	88,5	59,5	73,5
1	3	55,5	/	0	87,5	86,5	53,5	45,5
1	4	66,5	/	79,5	0	29,5	65	85,5
2	1	/	93,5	91	/	84,5	76,5	59,5
2	2	/	0	98,5	/	56,5	71	67,5
2	3	/	45,5	0	/	37	50,5	63,5
2	4	/	44	83,5	/	50	66,5	43
3	1	0	59,5	/	/	60,5	68,5	28
3	2	66	0	/	/	84	25,5	98
3	3	60,5	30	/	/	43,5	93	53
3	4	49,5	65,5	/	/	89	95	46,5
4	1	0	31	64	45	/	32,5	/
4	2	85,5	0	60	26,5	/	50	/
4	3	65	51,5	0	49,5	/	88	/
4	4	32,5	66	95	0	/	63	/

Tabla 31. Costes de entrenamiento – Modelo ampliado – Caso de prueba.

Por último, resulta necesario definir los costes de set-up, que representan lo que cuesta la configuración de un serú. Es decir, simbolizan el coste asociado a cambiar de una configuración en una etapa, con unos serus en funcionamiento, a otra etapa diferente en la que los serus seleccionados son otros.

En la *Tabla 32* se muestran los valores de los costes de set-up para el caso de prueba del modelo ampliado:

<i>Producto</i>	<i>Seru 1</i>	<i>Seru 2</i>	<i>Seru 3</i>	<i>Seru 4</i>	<i>Seru 5</i>	<i>Seru 6</i>	<i>Seru 7</i>
1	20	2	/	/	/	/	/
2	6,7	2,5	10	2,2	2,5	5	2,2
3	20	10	2,8	3,3	2,2	/	/
4	2,2	2,5	10	10	2	3,3	/

Tabla 32. Costes de set-up – Modelo ampliado – Caso de prueba.

4.3.2 Caso real

En este apartado se exponen los datos de partida correspondientes al escenario real, siguiendo la misma secuencia expuesta para el caso anterior.

En la *Tabla 33* se muestran los datos iniciales del caso real aplicado al modelo ampliado, donde volvemos a la casuística de 10 productos en total fabricados en 6 serus diferentes:

<i>N.º Serus</i>	6
<i>N.º Productos</i>	10
<i>Deadline (h)</i>	1500
<i>Coef. Emisión (kg CO₂e/kWh)</i>	0,785
<i>N.º Trabajadores</i>	10
<i>Coste energía (con penalización por consumo) (u.m./kWh)</i>	0,217
<i>Coste instalación (u.m./h)</i>	0,700

Tabla 33. Datos iniciales – Modelo ampliado – Caso real.

El *deadline* pasa a ser de 1.500 horas, ya que se van a obtener un gran número de productos diferentes. Los valores de coste de energía y de instalación, así como el coeficiente de emisión de dióxido de carbono por consumo de energía, se mantienen constantes respecto a los del caso anterior.

Como puede comprobarse, el número total de trabajadores ha pasado a ser 10, lo que ofrece una mayor versatilidad en las combinaciones finales de resultado, pudiendo incluso darse la situación en la que algún trabajador no sea seleccionado para ningún serú en ninguna etapa.

La *Tabla 34* recoge los serus seleccionables, la demanda en unidades, los límites de emisión y el *makespan* máximo permitido por tipo de producto en el caso real:

Producto	Serus seleccionables	Demanda (uds)	Límite CO ₂ (kg CO ₂ e)	Makespan (h)
1	2	20	130	130
2	5	70	600	140
3	5	40	230	85
4	6	30	200	115
5	6	20	130	124
6	5	30	360	136
7	2	20	150	152
8	3	30	231	121
9	6	40	395	73
10	2	20	145	141

Tabla 34. Serus seleccionables, demanda, límite CO₂ y de makespan – Modelo ampliado – Caso real.

Por otro lado, el tiempo de procesado requerido para cada producto en cada seru queda definido con los valores mostrados en la *Tabla 35*.

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	1	11	/	/	/	/
2	1	9	3	8	8	/
3	2	3	8	5	10	/
4	9	7	4	3	10	4
5	7	8	3	2	10	7
6	1	9	2	9	8	/
7	1	8	/	/	/	/
8	2	11	2	/	/	/
9	11	9	1	3	9	2
10	3	13	/	/	/	/

Tabla 35. Tiempo de procesado (h) – Modelo ampliado – Caso real.

Dado que el consumo siempre es distinto entre productos y también dependiendo del seru en que se realiza dicho producto, se detalla en la *Tabla 36* los kWh de energía consumida de forma particularizada para cada combinación seru-producto:

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	8	2	/	/	/	/
2	15	2	8	2	3	/
3	9	7	2	4	1	/
4	3	4	10	11	1	8
5	2	3	7	9	1	3
6	15	2	11	2	3	/
7	9	2	/	/	/	/
8	10	1	8	/	/	/
9	1	2	13	8	3	8
10	9	1	/	/	/	/

Tabla 36. Consumo de energía (kWh) – Modelo ampliado – Caso real.

La *Tabla 37* recoge los costes asociados con el entrenamiento de cada trabajador en las tareas requeridas para la producción de un determinado producto en un serú. Aquellos casos marcados con una barra “/” se corresponden con productos que no se fabrican en ese serú, mientras que el valor 0 significa que el trabajador ya conoce y tiene experiencia en las tareas que debe llevar a cabo en ese serú para la obtención de ese producto, por lo que no necesita entrenamiento de ningún tipo para ello.

Trabajador	Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	1	/	32,5	/	/	/	97
1	2	/	0	/	/	/	48
1	3	/	40	/	/	/	63,5
1	4	/	72	/	/	/	78,5
1	5	/	94,5	/	/	/	75,5
1	6	/	85	/	/	/	0
1	7	/	67	/	/	/	89,5
1	8	/	78	/	/	/	54
1	9	/	96,5	/	/	/	61
1	10	/	95	/	/	/	68
2	1	0	/	32,5	/	87,5	39,5
2	2	40	/	69	/	99,5	46
2	3	94	/	0	/	27,5	43,5
2	4	54	/	84	/	29	63,5
2	5	65,5	/	86	/	0	67
2	6	82	/	71,5	/	99	0
2	7	86	/	32,5	/	57	88,5
2	8	95	/	92	/	73,5	42
2	9	29	/	96	/	92,5	82
2	10	86	/	55	/	97,5	75,5
3	1	/	76,5	/	90	32,5	81
3	2	/	0	/	37,5	97,5	81
3	3	/	93	/	33,5	98	28,5
3	4	/	99,5	/	0	36	61,5
3	5	/	31	/	80,5	0	82
3	6	/	80	/	70	26	0
3	7	/	58	/	41	98,5	68,5
3	8	/	41,5	/	96	89	74,5
3	9	/	93,5	/	83,5	30,5	71,5
3	10	/	54	/	88,5	64	63,5
4	1	0	28	/	/	/	70
4	2	95	0	/	/	/	49
4	3	72,5	62,5	/	/	/	59,5
4	4	36,5	49	/	/	/	59,5
4	5	69	55,5	/	/	/	91,5
4	6	99,5	88	/	/	/	0
4	7	59,5	72	/	/	/	47
4	8	59	71	/	/	/	99,5
4	9	79	31	/	/	/	57
4	10	27,5	65	/	/	/	74,5

5	1	/	99,5	/	82	49	34,5
5	2	/	0	/	40	79,5	95
5	3	/	82	/	88	74,5	77
5	4	/	29,5	/	0	52,5	88
5	5	/	53,5	/	97,5	0	66,5
5	6	/	39,5	/	57,5	56,5	0
5	7	/	86,5	/	54	46	64
5	8	/	33,5	/	30	31	79,5
5	9	/	94,5	/	55,5	99,5	38,5
5	10	/	93	/	38	68,5	43
6	1	0	/	48,5	75	48	/
6	2	39,5	/	66,5	93,5	65,5	/
6	3	87,5	/	0	27,5	80,5	/
6	4	77,5	/	69,5	0	81	/
6	5	79,5	/	86,5	99	0	/
6	6	61,5	/	75,5	52,5	69	/
6	7	48	/	52	46,5	96	/
6	8	99,5	/	27,5	80,5	80,5	/
6	9	45	/	86	73	94,5	/
6	10	52	/	66	68	92	/
7	1	0	80,5	39	66	/	/
7	2	92	0	60	64,5	/	/
7	3	52,5	100	0	30,5	/	/
7	4	91	55	29	0	/	/
7	5	69	85,5	67	67,5	/	/
7	6	58,5	72,5	66	54,5	/	/
7	7	30	78	92,5	54	/	/
7	8	92,5	97,5	63	46,5	/	/
7	9	74,5	42,5	66,5	40	/	/
7	10	71	60	47,5	52,5	/	/
8	1	/	67	/	64	66	86
8	2	/	0	/	47	82,5	37,5
8	3	/	35	/	28	58,5	83
8	4	/	34	/	0	68	53,5
8	5	/	71	/	28,5	0	86,5
8	6	/	86	/	64,5	59,5	0
8	7	/	99,5	/	67	82,5	39
8	8	/	58,5	/	84	33,5	70
8	9	/	71	/	84,5	29,5	43,5
8	10	/	90,5	/	59	76,5	52
9	1	/	26,5	46,5	50,5	66,5	52
9	2	/	60	47,5	81,5	51,5	83
9	3	/	76	85,5	79,5	31,5	35
9	4	/	90	33,5	29,5	82	80,5
9	5	/	53,5	40	40,5	50	49,5
9	6	/	96	71,5	79	97,5	52,5
9	7	/	55,5	100	92	86	93
9	8	/	25	76	94,5	28	64
9	9	/	25,5	65,5	71,5	62	68,5

9	10	/	80,5	64,5	92,5	70,5	64
10	1	87	/	/	/	39,5	46,5
10	2	57	/	/	/	39	43
10	3	39	/	/	/	78	82
10	4	29,5	/	/	/	53	35
10	5	98	/	/	/	77	42
10	6	99	/	/	/	84	59,5
10	7	65,5	/	/	/	89,5	65,5
10	8	32,5	/	/	/	39,5	64,5
10	9	96,5	/	/	/	98,5	66
10	10	58	/	/	/	79	72,5

Tabla 37. Costes de entrenamiento – Modelo ampliado – Caso real.

Finalmente, los costes asociados con la instalación de cada uno de los serus en los cambios entre etapas se muestran en la *Tabla 38*:

Producto	Seru 1	Seru 2	Seru 3	Seru 4	Seru 5	Seru 6
1	17,5	1,6	/	/	/	/
2	17,5	1,9	5,8	2,2	2,2	/
3	8,7	5,8	2,2	3,5	1,7	/
4	1,9	2,5	4,4	5,8	1,7	4,4
5	2,5	2,2	5,8	8,7	1,7	2,5
6	17,5	1,9	8,7	1,9	2,2	/
7	17,5	2,2	/	/	/	/
8	8,7	1,6	8,7	/	/	/
9	1,6	1,9	17,5	5,8	1,9	8,7
10	5,8	1,3	/	/	/	/

Tabla 38. Costes de set-up – Modelo ampliado – Caso real.

4.4 Hipótesis de partida

Para el caso del modelo ampliado que se propone en este apartado, se toman una serie de hipótesis de partida, algunas de las cuales son también consideradas en el modelo básico explicado anteriormente. Estas suposiciones permiten simplificar el problema de partida de modo que seamos capaces de modelarlo mediante ecuaciones resolubles y de manera lineal.

En concreto, las hipótesis tomadas para el modelo ampliado son las siguientes:

1. Los serus son de tipo yatai, por lo que sólo existe un único trabajador asociado a cada seru que esté fabricando el producto de la etapa actual de funcionamiento.
2. No existe traspaso de trabajadores entre un seru y otro, del mismo modo que, al igual que ocurría en el modelo básico, no se permiten las transacciones de producto, subproductos o materiales entre un seru y

otro que estén funcionando a la vez.

3. El tiempo que cada trabajador tarda en fabricar un producto es una constante para cada seru. Es decir, las habilidades personales del trabajador para realizar las tareas que cada producto requiere mediante los medios disponibles en cada seru se considera un valor fijo entre trabajadores, de manera que se asume que, tras el entrenamiento pertinente en cada una de las tareas, todos los trabajadores poseen un grado de habilidad igual.
4. Aunque no se tiene en cuenta el tiempo que pueda haber entre la configuración de serus de una etapa y la siguiente, sí se refleja el cambio que supone mediante los costes de set-up. Es decir, aunque el tiempo de reconfiguración sea despreciable, su impacto es incorporado en el modelado mediante el coste económico que supone.
5. No existe fabricación simultánea de dos tipos de productos distintos. La elaboración de un producto no comienza hasta que se ha finalizado la producción de toda la demanda requerida del producto anterior.
6. Todos los trabajadores son seleccionables para todas las combinaciones posibles seru-producto. Su selección dependerá de los costes de entrenamiento requeridos para enseñarles a realizar las tareas necesarias. Es decir, de partida, se asume que todos los trabajadores son capaces de aprender todas las tareas con el entrenamiento adecuado, sea este más o menos costoso en cada caso.
7. Existen serus seleccionables para todos los productos que se pretenden realizar, y los serus funcionan sin necesidad de realizar paradas, por lo que no se contemplan situaciones en las que la producción de un seru deba ser interrumpida por labores de mantenimiento ni corrección de fallos. Se asume que estas actividades son realizadas durante el tiempo en que la producción no está en marcha.
8. Se conoce la demanda requerida de cada tipo de producto, al igual que ocurría para el caso del modelo básico comentado anteriormente.
9. No existe ninguna diferencia entre el consumo de energía asociado a la elaboración de un producto en un seru por un trabajador y otro. Es decir, se asume que el tiempo que cada trabajador requiere con cada equipo del seru, así como la técnica que emplea para realizar las tareas, es idéntica a la del resto de trabajadores.
10. El tiempo estipulado como *deadline* es suficientemente grande para que existan combinaciones posibles que puedan generar toda la demanda requerida de cada tipo de producto mediante el empleo de sus serus seleccionables.

4.5 Variables implicadas

Antes de mostrar el modelo matemático planteado, conviene comentar cada una de las variables que forman parte de las ecuaciones del mismo. Por esto, en este apartado se procede a enumerar cada una de ellas, tanto aquellas que son compartidas con el modelo básico planteado en el apartado Problema de optimización de producción Seru sostenible, como las que son nuevas y específicas del nuevo modelo planteado.

- Parámetros disponibles de partida:
 - P : número de tipos de producto.
 - S_p : número total de serus seleccionables del tipo de producto p .
 - Q_p : demanda de unidades del producto tipo p .
 - CS_{ps} : costes de set-up asociados al montaje del seru s con el objetivo de emplearlo para la producción del producto tipo p . Tiene unidades de u.m.
 - t_{ps} : tiempo de procesado del producto tipo p en el seru s . Tiene unidades de $horas/unidad$
 - c_{ps} : energía consumida por unidad del producto tipo p fabricada en el seru s . Tiene unidades de $kWh/unidad$
 - CE : coste asociado al consumo de energía. Es independiente del seru y el producto, así como del trabajador. Indica el coste en que se incurre debido al consumo de 1 kWh de energía, penalizado para conseguir hacer que la solución tienda a minimizar el consumo. Tiene unidades de $u.m./kWh$
 - E_p : límite superior de emisión de dióxido de carbono que se permite para el procesado de una unidad de producto tipo p . Tiene unidades de $kgCO_2e/unidad$
 - DT : tiempo máximo para completar la producción de todas las unidades demandadas de todos los productos. Tiene unidades de horas.
 - CT_{wps} : costes de entrenamiento del trabajador w para realizar las tareas asociadas a la obtención del producto tipo p mediante el uso de los equipos y la maquinaria disponibles en el seru s .

- ξ_{ec} : coeficiente de emisión de CO₂ relativo al consumo de electricidad. Es una constante de valor 0,785 y sus unidades son de $kgCO_2e/kWh$
 - CF : coeficiente que mide los costes asociados al uso de las instalaciones requeridas. Es una constante que vale 0,7 y sus unidades son de $u.m./h$
 - DT_p : *makespan* máximo permitido para la elaboración de toda la demanda requerida del producto tipo p .
- Conjunto de índices:
 - p : índice que recorre los tipos de producto. Toma valores desde 1 hasta P .
 - s : índice que recorre los serus. Toma valores desde 1 hasta S_p .
 - w : índice que recorre los trabajadores. Toma valores desde 1 hasta W .
- Variables intermedias:
 - z_p : mide el tiempo que se emplea en el procesado del producto tipo p , por lo que su valor mide la duración de la etapa correspondiente a la fabricación del producto tipo p . Tiene unidades de horas.
- Variables de decisión:
 - X_{ps} : variable que indica si el producto tipo p ha sido asignado al seru s . Es una variable binaria cuyos valores indican:
 - 1: el producto tipo p ha sido asignado al seru s .
 - 0: el producto tipo p no ha sido asignado al seru s .
 - Y_{pw}^w : variable con la que se registra si el trabajador w ha sido asociado al seru s para la elaboración del producto tipo p . Es una variable binaria, y el significado de sus valores es el siguiente:

- 1: el trabajador w ha sido asociado a participar en la obtención del producto tipo p mediante el empleo del sero s .
 - 0: el trabajador w no ha sido asociado a participar en la obtención del producto tipo p mediante el empleo del sero s .
- Q_{ps} : cantidad de unidades del producto tipo p que se han asignado al sero s .

4.6 Modelo matemático

Finalmente, se presenta el modelo matemático desarrollado con el objetivo de resolver el problema descrito en los apartados anteriores. Como puede verse, se trata de un modelo lineal, lo que posibilita su resolución mediante numerosas metodologías.

A diferencia del anterior, este modelo plantea una única función objetivo, que representa el coste total de la reconfiguración del sistema y la producción de la demanda especificada para cada tipo de producto. Estos costes son de cuatro naturalezas distintas:

- Costes de set-up: asociados al montaje de los seros requeridos entre una etapa de funcionamiento y la siguiente.
- Costes de consumo de energía: representan el gasto energético en que se incurre para llevar a cabo la producción de la demanda de todos los productos.
- Costes de entrenamiento: miden lo que cuesta formar a los trabajadores disponibles para que sean capaces de realizar las tareas específicas que requiere la producción de una unidad de cada producto con los equipos y medios disponibles en cada uno de los seros que son seleccionables para dicho producto.
- Costes de instalación: representan lo que cuesta disponer de la instalación en funcionamiento por cada hora de producción.

El modelo matemático propuesto para la resolución del problema planteado se detalla a continuación:

Minimizar:

$$f_3 = \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^{S_p} CS_{ps} X_{ps} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^{S_p} CE c_{ps} Q_{ps} + \sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^{S_p} CT_{wps} Y_{ps}^w + \sum_{p=1}^P CF z_p \quad (1)$$

Sujeto a:

$$z_p \geq t_{ps} Q_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (2)$$

$$X_{ps} \leq Q_{ps} \leq Q_p X_{ps} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} Q_{ps} = Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} Q_{ps} c_{ps} \xi_{ec} \leq E_p Q_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^P z_p \leq DT \quad (6)$$

$$X_{ps} \in \{0,1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (7)$$

$$Q_{ps} \in \mathbb{Z} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (8)$$

$$Y_{ps}^w \in \{0,1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (9)$$

$$X_{ps} = \sum_{w=1}^W Y_{ps}^w \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S_p\} \quad (10)$$

$$\sum_{s=1}^{S_p} Y_{ps}^w \leq 1 \quad \forall w, p \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^P z_k \leq DT_p \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (12)$$

Se describe a continuación lo que cada ecuación del modelo representa, así como las implicaciones que tiene de cara al resultado que se obtenga:

- **Ecuación (1).** Función objetivo del modelo. Representa el coste total que se pretende minimizar con la solución final. Como se ha expuesto anteriormente, incluye los costes de set-up, consumo energético, entrenamiento de trabajadores y uso de la instalación. Los costes energéticos se encuentran penalizados mediante un alto coeficiente de coste por kWh, con lo que se pretende reducir el consumo en la mayor medida de lo posible.
- **Ecuación (2).** Significa que el tiempo de duración de la etapa correspondiente al producto tipo p será el máximo tiempo que emplee el sero que más tarde en producir su porción de la demanda de dicho producto. Por ejemplo, si tenemos 3 seros trabajando en paralelo a la vez para fabricar el producto 1, el

tiempo de duración de la etapa 1 será el correspondiente al sero que más tarde de los 3 en producir su parte de la demanda del producto tipo 1.

- **Ecuación (3).** Esta restricción impone que, si un producto no ha sido asociado a un sero, entonces la porción de la demanda del dicho producto cubierta por ese sero es 0. Igualmente, obliga a que, si un producto es asociado a un sero, la cantidad de unidades de dicho producto que se fabrican en ese sero debe ser menor o igual a la demanda total de dicho producto.
- **Ecuación (4).** Con esta ecuación se establece que la cantidad elaborada de un producto por todos los seros que lo fabrican es igual a la demanda total establecida para dicho producto. Es decir, la demanda se satisface de manera exacta.
- **Ecuación (5).** Implica que las emisiones de dióxido de carbono provocadas por la elaboración del total de la demanda un determinado producto no puede superar un límite establecido de antemano, que depende del producto en cuestión.
- **Ecuación (6).** Se impone un *makespan* global que no debe superarse en la fabricación del total de la demanda de todos los productos.
- **Ecuación (7).** Esta restricción simplemente impone que la variable de decisión X_{ps} es binaria: puede valer 0 ó 1, dependiendo de si ese sero va a fabricar ese producto.
- **Ecuación (8).** Con esta ecuación, se establece que la cantidad de unidades del producto tipo p asociadas al sero s , denotada por Q_{ps} , tiene que ser un número entero.
- **Ecuación (9).** Significa que la variable de decisión Y_{ps}^w es binaria: puede valer 0 ó 1, dependiendo de si ese trabajador va a ser asignado a ese sero a fabricar ese producto.
- **Ecuación (10).** Se asigna al trabajador w únicamente a una combinación sero-producto que haya sido asignada. Es decir, el trabajador w fabricará el producto tipo p en el sero s sólo si el producto tipo p ha sido asignado al sero s .
- **Ecuación (11).** Con esta restricción se establece que cada trabajador sólo puede ir en un sero de cada producto. Es decir, que durante la etapa de funcionamiento en la que se fabrica el producto tipo p , el trabajador w asociado a elaborar dicho producto en el sero s no formará parte de la producción de ningún otro sero más que el suyo.

- **Ecuación (12).** El tiempo que dura la fabricación del total de la demanda del producto tipo p no puede superar el *makespan* máximo establecido para el mismo. Este valor es independiente según el tipo de producto, y como se ha visto antes, representa el tiempo empleado por el sero que más tarda dentro de esa etapa de funcionamiento. Con esta restricción, se asegura el cumplimiento de la fecha de entrega de ese producto.

5 EXPERIMENTACIÓN

5.1 Metodología de resolución – Lenguaje *Python*

Para la resolución de los dos problemas planteados se ha utilizado el lenguaje de programación de alto nivel *Python* en conjunto con la herramienta de optimización *Gurobi*, que ha sido incorporada al IDE de programación *Anaconda*, y que es la encargada de solucionar el problema de programación lineal.

El lenguaje de programación *Python* se caracteriza por dar prioridad a la facilidad de interpretación de sus códigos, de forma que se convierte en un recurso de gran interés para dar solución a todo tipo de problemas cuando se carece de una amplia base de conocimientos en programación.

Se trata de un lenguaje orientado a objetos que cuenta con numerosas librerías, la gran mayoría de ellas de tipo *open source*, que le dotan de una gran versatilidad y de numerosas funcionalidades.

En cuanto a *Gurobi Optimizer*, permite obtener soluciones para problemas de optimización de múltiples tipos: programación lineal, cuadrática, restringida, de números enteros mixtos, etc. Empleando *Gurobi*, se generan modelos de optimización a los que se puede añadir restricciones de cualquier tipo, así como múltiples funciones objetivo, ya que dispone de diversas metodologías para establecer las prioridades entre unas y otras.

Su implementación en *Python* resulta muy sencilla, y aunque no se trata de una herramienta *open source* como el resto, sí ofrece la posibilidad de obtener licencias temporales gratuitas para aplicaciones con fines no comerciales.

En los anexos de este proyecto, Código Python modelo original linealizado y Código Python modelo ampliado, pueden consultarse los códigos utilizados para la resolución de ambos problemas.

5.2 Escenarios

Los escenarios a los que se han aplicado los modelos planteados son los correspondientes al caso de prueba y al caso real que se han comentado en los apartados anteriores. Estos escenarios difieren entre sí dependiendo del modelo de optimización que se les va a aplicar, razón por la que los datos de partida no son los mismos en el modelo básico linealizado descrito en el apartado Problema de optimización de producción Seru sostenible que en el modelo ampliado, expuesto en el apartado Problema de optimización ampliado – Inclusión de coste total.

Dentro del modelo básico linealizado, y para cada uno de los casos (prueba y real) se han considerado dos sub escenarios diferentes: uno en el que la función objetivo a minimizar es el *makespan*, dejando libertad a la de

emisiones de CO₂, por lo que éstas sólo quedan limitadas por las restricciones adicionales, y otro en el que la función objetivo a minimizar es el CO₂ emitido, por lo que el *makespan* se deja libre en ese caso, y sólo queda restringido por las condiciones específicas que le imponen un valor tope.

Por otro lado, en el caso del modelo ampliado se estudian el caso de prueba y el caso real para la minimización del coste total como función objetivo.

En resumen, los escenarios estudiados en el proceso de experimentación son los siguientes:

- Modelo básico linealizado:
 - Caso de prueba:
 - Minimización de *makespan*.
 - Minimización de CO₂.
 - Caso real:
 - Minimización de *makespan*.
 - Minimización de CO₂.
- Modelo ampliado:
 - Caso de prueba:
 - Minimización de coste total.
 - Caso real:
 - Minimización de coste total.

5.3 Resultados

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos en la resolución de cada uno de los escenarios considerados y según el modelo aplicado para su optimización. Se detallarán los valores que toman las funciones objetivo en cada caso, así como las distribuciones resultantes de productos por serus, y de los trabajadores

asociados a cada combinación. Así mismo, se evaluarán parámetros como el *makespan* total e individual de cada producto, el coste total, las emisiones de CO₂ globales y por tipo de producto, y la porción de demanda de cada producto asignada a cada seru que lo fabrica.

5.3.1 Modelo original linealizado

Se exponen en primer lugar los resultados obtenidos en el modelo básico linealizado, tanto para el caso de prueba como para el real, en cuanto a minimización de *makespan* y CO₂. Así mismo, se añade al final del apartado una comparativa de los valores de *makespan* y CO₂ que aporta la linealización del modelo con los resultados arrojados por el algoritmo genético en el artículo de Liu et al [3].

5.3.1.1 Caso de prueba

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para el modelo original linealizado aplicado al caso de prueba y para dos objetivos distintos: minimización de *makespan* y de emisiones de CO₂.

5.3.1.1.1 Minimización *makespan*

Se ha realizado la optimización del modelo marcando como objetivo la minimización del *makespan*. Con esto, se ha conseguido reducir el tiempo total de fabricación de los 4 tipos de productos a un total de 111 horas, mientras que las emisiones de CO₂, al ser un parámetro que simplemente es limitado por un tope superior, resultan ser de 965 kg de CO₂ emitidos a la atmósfera.

$$\text{Makespan} = 111 \text{ h}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = 965 \text{ kg CO}_2 \text{ e}$$

$$\text{Tiempo de computación} = 0,06247 \text{ segundos}$$

Para conseguir esto, debe satisfacerse la demanda de cada tipo de producto de manera exacta fabricando en cada seru las unidades que se detallan en la *Tabla 39*:

		SERU							Demanda
		1	2	3	4	5	6	7	
PRODUCTO	1	19	1						20
	2	15	5	24	5	5	11	5	70
	3	21	11	3	3	2			40
	4	2	2	10	11	2	3		30

Tabla 39. Uds de producto – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.

Evaluando el tiempo de procesado que esta combinación supone para toda la demanda de cada tipo de producto, así como las emisiones que tienen lugar durante la etapa de cada uno de ellos, se obtienen los resultados que se

detallan a continuación en la *Tabla 40*:

<i>PRODUCTO</i>	<i>Tiempo de procesado (h)</i>	<i>CO₂ emitido (kg CO₂ e)</i>
1	19	135,80
2	48	448,23
3	22	232,36
4	22	149,15

Tabla 40. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.

Se comprueba que todas las restricciones establecidas se cumplen: todos los productos son asociados como mínimo a un sero seleccionable para ellos, la demanda de cada producto se satisface de forma exacta, el tiempo de procesado no supera el límite establecido por el *deadline* y el dióxido de carbono emitido por cada producto es inferior al tope definido.

Por último, en la *Figura 7* se ha representado un gráfico temporal en el que puede observarse la ocupación de cada uno de los 7 seros durante las etapas correspondientes a cada producto. Se observa que el producto 1 es fabricado en el sero 1 y 2. En concreto, de las 20 unidades demandadas de este producto, 19 de ellas son asociadas al sero 1 y sólo 1 unidad al sero 2. Sin embargo, la diferencia en términos temporales no es tan grande. Esto es debido a que el sero 2 emplea mucho más tiempo en fabricar una unidad de producto 1, razón por la que la mayoría de la demanda de este producto ha ido a parar al sero 1.

También puede comprobarse que, hasta que no termina el sero más lento en una etapa determinada, no comienza la fabricación del producto siguiente. Es decir, nunca se fabrican dos productos distintos de manera simultánea.

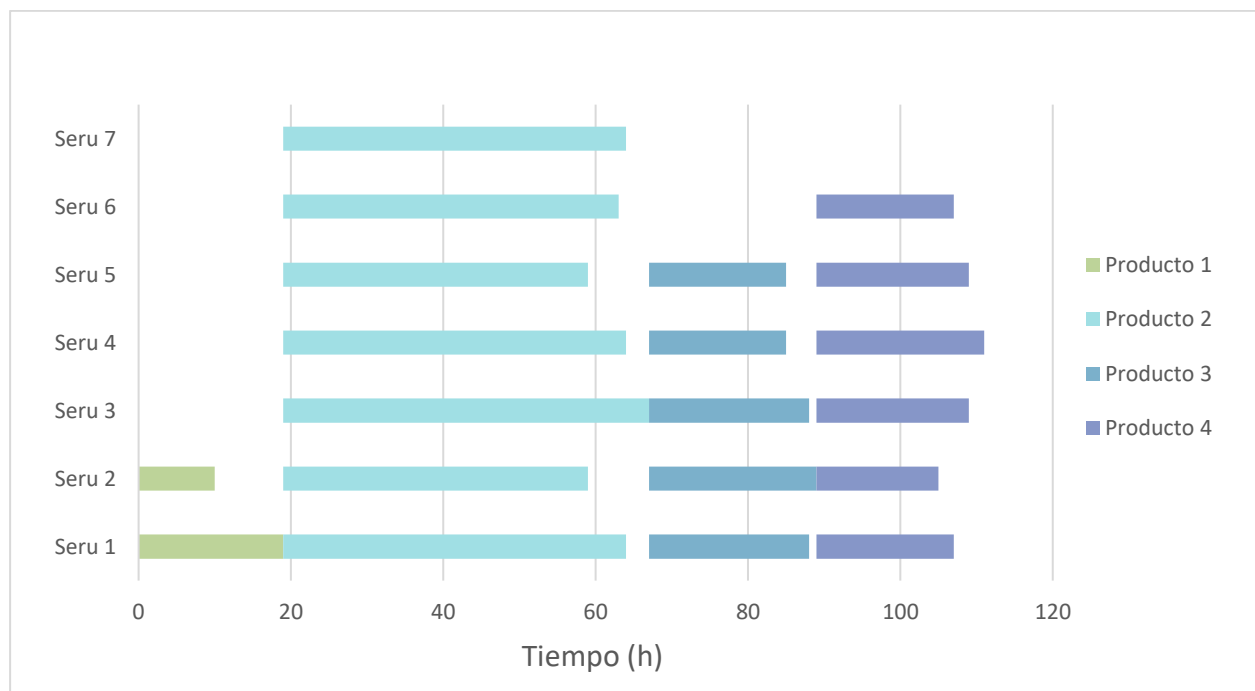


Figura 7. Distribución de productos por seros – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización makespan.

5.3.1.1.2 Minimización de emisiones de CO₂

Cambiamos ahora la función objetivo del modelo, pasando de buscar la minimización del tiempo total de producción, *makespan*, a minimizar las emisiones de dióxido de carbono.

De este modo, se han conseguido reducir las emisiones a un total de 200 kg de CO₂. Se observa que, en este caso, el tiempo total de fabricación ha tomado el valor máximo permitido por el *deadline*, es decir, 800 horas. Es decir, aumentar el tiempo de producción permite obtener combinaciones seru-producto cuyas emisiones son menores. Si quitásemos la restricción del *deadline*, el *makespan* sería aún mayor, ya que el modelo busca minimizar el CO₂.

$$\text{Makespan} = 800 \text{ h}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = 200 \text{ kg CO}_2 \text{ e}$$

$$\text{Tiempo de computación} = 0,04682 \text{ segundos}$$

En la *Tabla 41* se especifican las unidades de cada tipo de producto que se han asociado por serus, pudiendo comprobarse nuevamente que la solución obtenida satisface la demanda de manera exacta:

		SERU							Demanda
		1	2	3	4	5	6	7	
PRODUCTO	1		20						20
	2		36					34	70
	3				24	16			40
	4	16				14			30

Tabla 41. Uds de producto – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.

Por otro lado, en la *Tabla 42* se muestran el tiempo de procesado particular de cada producto y las emisiones de dióxido de carbono que supone la fabricación de la demanda de cada uno de ellos. Nuevamente, todas las restricciones impuestas en cuanto a *deadline* y emisiones son satisfechas:

PRODUCTO	Tiempo de procesado (h)	CO ₂ emitido (kg CO ₂ e)
1	200	31,40
2	312	83,21
3	144	62,80
4	144	23,55

Tabla 42. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.

Finalmente, en la *Figura 8* podemos observar la distribución temporal de la fabricación de los 4 productos en los 7 serus disponibles. Se observa que en este caso el reparto resulta bastante opuesto al que se obtuvo anteriormente. El número de serus que trabajan simultáneamente en cada etapa de funcionamiento se reduce drásticamente. Mientras que, en el caso de antes, todos los serus seleccionables para cada producto tenían una

porción de la demanda de dicho producto asignada, en este caso, al no existir una necesidad de minimizar el tiempo de procesado, las unidades de producto son asociadas casi en su totalidad a aquellos serus cuyas emisiones al fabricarlos son más bajas.

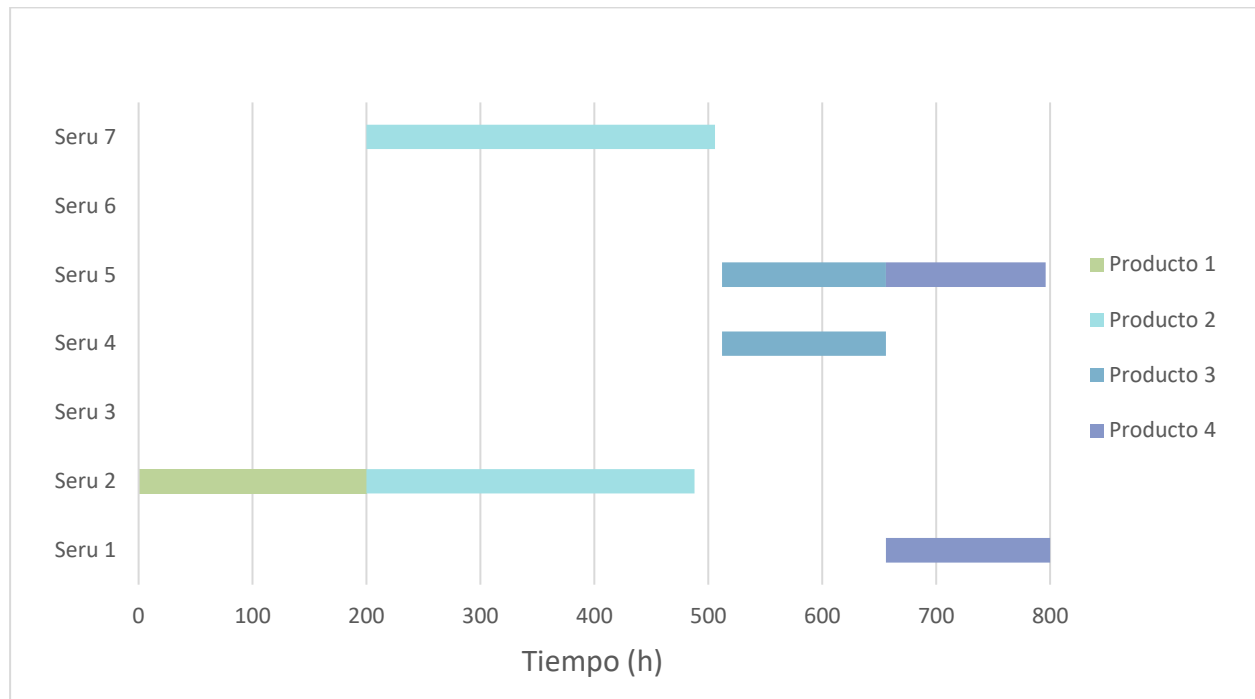


Figura 8. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso de prueba – Minimización emisiones CO₂.

5.3.1.1.3 Comparativa modelo original con algoritmo genético vs modelo linealizado

El objetivo de este apartado es realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por el modelo lineal planteado y los que se detallan en el artículo de Liu et al [3], que resuelve el problema original sin linealizar mediante la aplicación de algoritmo genético al problema de minimización multiobjetivo.

En dicho artículo, se obtiene una muestra de numerosas combinaciones de salida posibles, lo que en algoritmo genético se conoce como población. El *makespan* de la población resultado oscila entre las 422 y las 767 horas, mientras que las emisiones por su parte se mueven entre los 208,82 y los 402,71 kg de CO₂ emitido.

En el caso del modelo linealizado que se ha resuelto en este proyecto, tal como se ha visto en los apartados anteriores, el *makespan* se mueve en un intervalo definido entre las 111 y las 800 horas. El proceso seguido para realizar la comparativa de nuestro modelo respecto al algoritmo genético ha sido fijar el valor del *makespan* a un rango de valores comprendido entre sus extremos, y para cada valor fijo de *makespan* de dicho rango, minimizar el CO₂. La combinación obtenida de *makespan* y CO₂ en cada resultado equivaldría a un individuo de la población resultado del algoritmo genético.

En concreto, en la *Tabla 43* se muestran los valores arrojados por el algoritmo genético y por el modelo

linealizado tanto para el *makespan* como para las emisiones de CO₂:

<i>Datos Liu et al [3]</i>		<i>Modelo básico</i>	
<i>Makespan (h)</i>	<i>Emisiones (kg CO₂ e)</i>	<i>Makespan (h)</i>	<i>Emisiones (kg CO₂ e)</i>
422	402,71	120	862,72
442	372,11	150	742,61
481	350,91	180	642,92
492	335,39	210	575,41
493	328,92	240	517,32
507	328,14	270	463,94
515	293,59	300	420,76
553	284,18	330	378,37
559	271,61	360	348,54
600	270,05	390	332,06
602	266,91	420	315,57
605	259,84	450	299,09
612	252,00	480	282,6
616	244,93	510	266,12
617	238,65	540	249,63
634	235,51	570	237,07
664	228,44	600	227,65
669	228,44	630	221,37
683	222,94	660	215,88
688	219,81	690	211,17
695	212,74	720	208,03
767	208,82	750	204,89
		780	202,53

Tabla 43. Resultados del algoritmo genético frente al modelo linealizado – Caso de prueba.

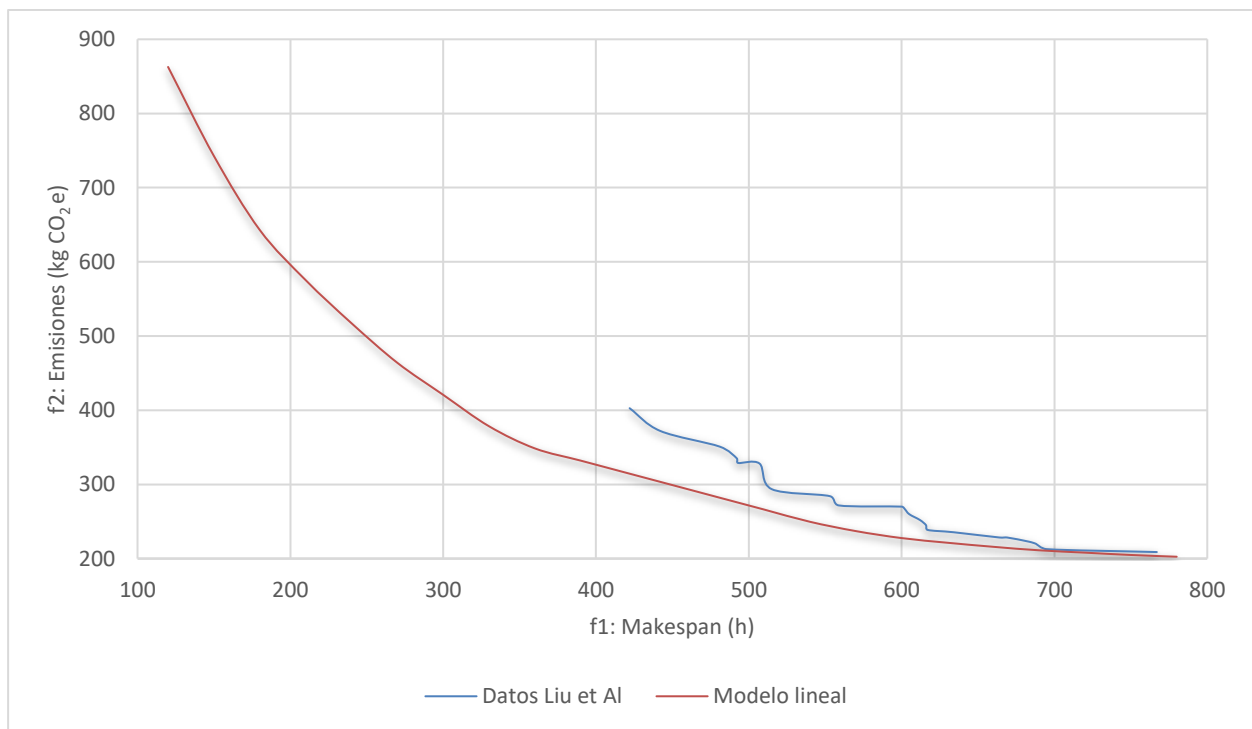


Figura 9. Comparativa gráfica del algoritmo genético frente al modelo linealizado - Caso de prueba.

En la *Figura 9* mostrada anteriormente se ha representado la frontera de Pareto correspondiente a los resultados del modelo linealizado y del algoritmo genético para el *makespan* y las emisiones de dióxido de carbono. Podemos comprobar que la linealización del modelo original permite obtener soluciones que minimizan más las dos funciones objetivo de manera simultánea, razón por la que la curva está más próxima a los ejes en todo momento.

Es decir, empleando el modelo linealizado se consiguen adoptar soluciones mejores tanto desde el punto de vista de la duración de la producción como de su impacto en el medio ambiente.

5.3.1.2 Caso real

En este apartado, de manera análoga al anterior, se detallan y comentan los resultados que arroja el modelo linealizado para el caso de aplicación real. Nuevamente se plantean dos procesos de optimización diferentes, cada uno de ellos con un objetivo independiente como se hizo para el caso de prueba: minimización de *makespan* en primer lugar y posteriormente de CO₂.

5.3.1.2.1 Minimización *makespan*

Fijando como función objetivo la minimización del *makespan*, se obtiene un tiempo total de producción para la demanda de los 10 productos de 273 horas. Las emisiones de dióxido de carbono, por su parte, ascienden a los 2249 kg CO₂. Este valor de emisiones cumple la restricción impuesta como máxima contaminación por CO₂, si bien su valor es elevado al no formar parte de la función minimizada en este escenario.

$$\text{Makespan} = 273 \text{ h}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = 2249 \text{ kg CO}_2 \text{ e}$$

$$\text{Tiempo de computación} = 0,16194 \text{ segundos}$$

En la *Tabla 44* se detallan las unidades de producto asociadas a cada seru en la solución obtenida:

		SERU						Demanda
		1	2	3	4	5	6	
PRODUCTO	1	19	1					20
	2	42	4	14	5	5		70
	3	16	11	4	6	3		40
	4	3	3	7	9	2	6	30
	5	2	2	5	8	1	2	20
	6	17	1	8	2	2		30
	7	18	2					20
	8	14	2	14				30
	9	1	2	19	6	2	10	40
	10	17	3					20

Tabla 44. Uds de producto – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.

Como puede comprobarse, la demanda total de cada uno de los productos de este escenario es satisfecha de forma exacta, al igual que ocurría en el caso anterior. Esto se cumple puesto que la restricción (5) del modelo linealizado así lo imponía.

Por otro lado, en la *Tabla 45* se recogen los valores del tiempo de procesado individual de cada tipo de producto necesario para elaborar el total de la demanda específica, así como el dióxido de carbono emitido durante la fabricación de cada producto. Puede comprobarse nuevamente que se cumple el tiempo máximo de procesado establecido para la demanda de cada tipo de producto, por lo que se cumplen las fechas límite de entrega estipuladas para cada uno de ellos. Del mismo modo, los límites de CO₂ máximo permitido por tipo de producto no se superan, algo impuesto en la restricción (6).

PRODUCTO	Tiempo de procesado (h)	CO ₂ emitido (kg CO ₂ e)
1	19	120,89
2	42	608,38
3	33	200,96
4	28	188,40
5	16	97,34
6	18	278,68
7	18	130,31
8	28	199,39
9	20	303,01
10	51	122,46

Tabla 45. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.

Finalmente, en la *Figura 10* se muestra la distribución final de las unidades de productos obtenidas en cada uno de los serus en función del tiempo para el caso real:

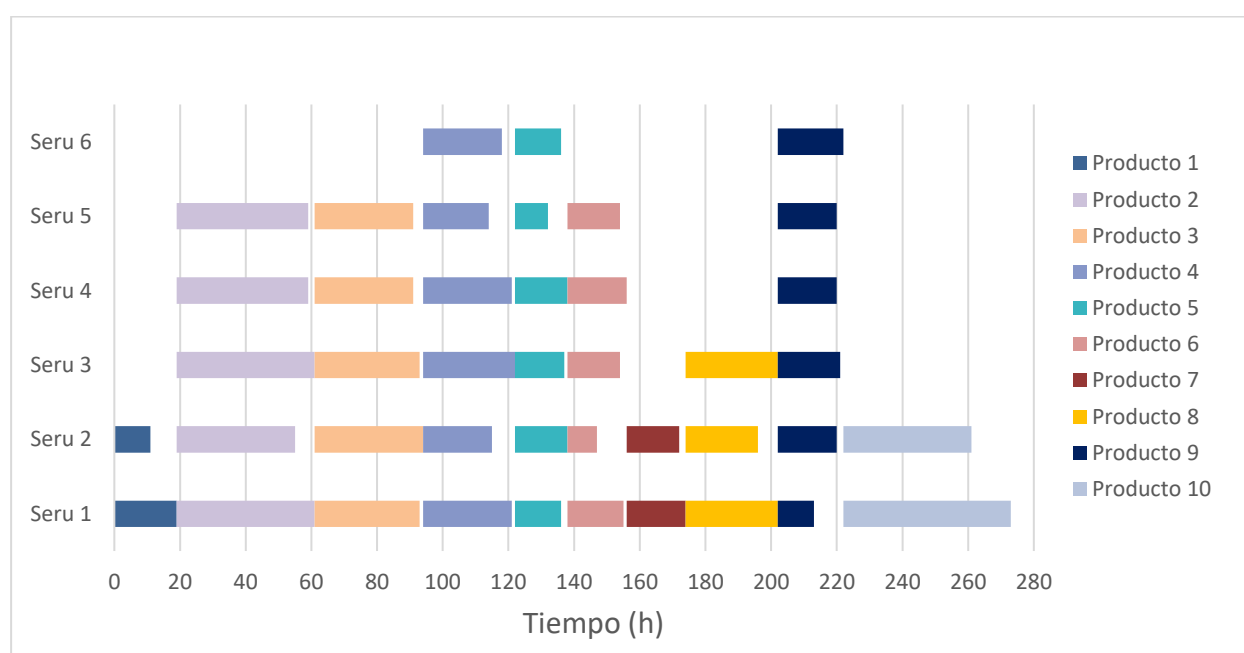


Figura 10. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso real – Minimización makespan.

Puede comprobarse que, en cada una de las etapas, todos los serus seleccionables del producto correspondiente que se está fabricando son elegidos para aportar una determinada cantidad de la demanda de dicho producto. La razón por la que todos los serus posibles son seleccionados en cada producto es que estamos tratando de minimizar el tiempo total de producción, *makespan*.

Por esta razón, siempre va a resultar óptimo que todos los serus capaces de elaborar un producto estén funcionando de manera simultánea, con el objetivo de reducir al máximo el tiempo de finalización de la demanda de ese producto.

También se corrobora al igual que en los casos anteriores que ninguna etapa de producción empieza hasta que haya finalizado por completo la anterior, estando prohibida la elaboración de productos diferentes de forma paralela.

5.3.1.2.2 Minimización de emisiones de CO₂

Cuando fijamos como objetivo la minimización del CO₂ en el escenario real, el *makespan* toma el máximo valor posible que le permite la restricción del *deadline*, es decir, 1.500 horas. Esto es así debido a que la optimización del problema tiende a buscar las combinaciones seru-producto que menor contaminación producen, pero éstas no tienen por qué ser las que suponen un menor tiempo de producción. Las emisiones obtenidas en este caso se reducen hasta los 586 kg CO₂ e, dado que esta vez el tiempo de producción no es factor limitante en la solución y el impacto medioambiental puede reducirse hasta aproximadamente la cuarta parte que en el caso anterior.

$$Makespan = 1.500 h$$

$$Emisiones CO_2 = 586 kg CO_2 e$$

$$Tiempo de computación = 0,10205 segundos$$

En la *Tabla 46* se recogen las unidades de cada tipo de producto que han sido asociadas a cada seru.

		SERU						Demanda
		1	2	3	4	5	6	
PRODUCTO	1	17	3					20
	2		22		25	23		70
	3			20	4	16		40
	4	10	11			9		30
	5	6	5			4	5	20
	6		10		10	10		30
	7		20					20
	8		30					30
	9	12	15			13		40
	10		20					20

Tabla 46. Uds de producto – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.

Se ratifica que la demanda los 10 tipos de producto queda nuevamente completada de forma exacta, si bien la distribución por serus varía al darse prioridad a aquellos serus cuyas emisiones son más bajas.

En la *Tabla 47* se muestran las soluciones relativas al *makespan* particular de cada etapa y a las emisiones totales que se producen por la elaboración de la demanda de cada producto, cumpliendo las restricciones impuestas a tales efectos. Se observa como los tiempos de procesado de cada producto son significativamente mayores que los que se obtenían en el caso anterior, mientras que las emisiones disminuyen drásticamente al ser el objetivo de minimización en este escenario.

<i>PRODUCTO</i>	<i>Tiempo de procesado (h)</i>	<i>CO₂ emitido (kg CO₂ e)</i>
1	33	111,47
2	200	127,96
3	160	56,52
4	90	62,16
5	42	36,11
6	90	54,95
7	160	31,40
8	330	23,55
9	135	63,59
10	260	15,70

Tabla 47. Tiempo máximo y emisiones – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.

Por último, en la *Figura 11* se tiene la representación temporal que se daría en caso de adoptar la solución obtenida en este apartado:

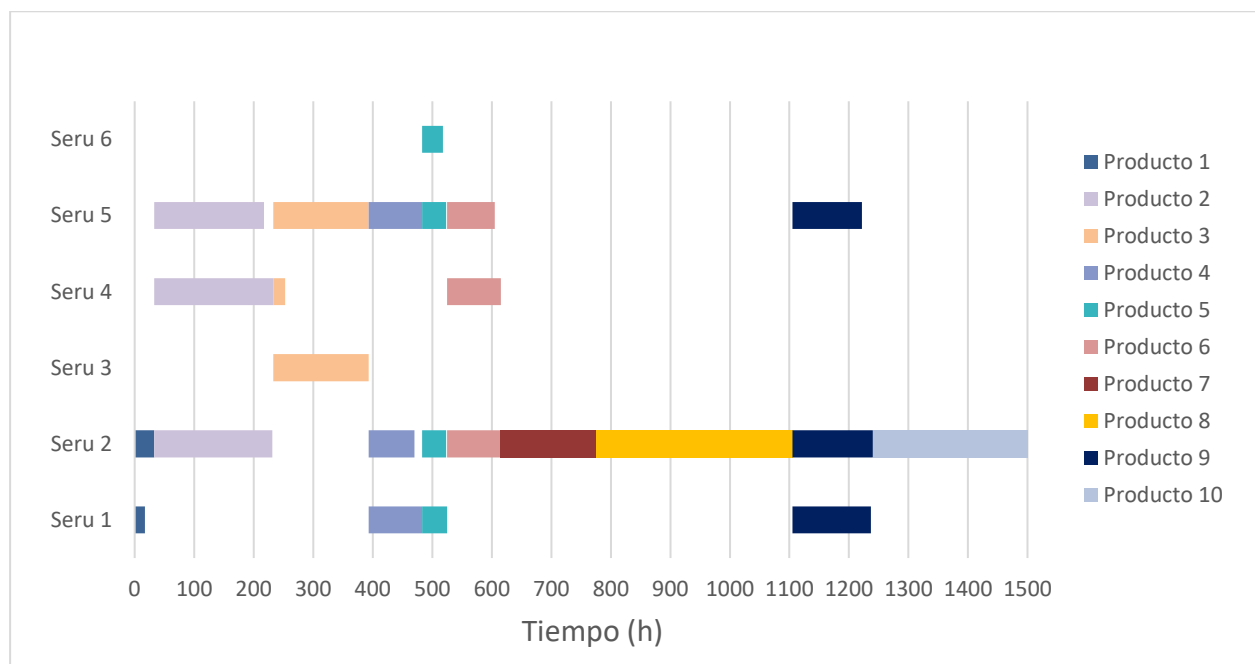


Figura 11. Distribución de productos por serus – Modelo básico – Caso real – Minimización emisiones CO₂.

A diferencia de en el caso de minimización del *makespan*, podemos ver que no todos los serus seleccionables

son elegidos para cada tipo de producto, puesto que deja de ser prioritaria la reducción de los tiempos totales y ya no resulta necesaria la producción simultánea de un mismo producto mediante todos los medios posibles para ello. Por el contrario, se seleccionan casi en su totalidad únicamente aquellos que ofrecen unos valores de emisiones más bajos, teniendo que recurrir al resto de serus únicamente como recurso para cumplir los tiempos de producción establecidos por el *deadline* y los *makespan* particulares de cada producto.

5.3.1.2.3 Comparativa modelo original con algoritmo genético vs modelo linealizado

El objetivo de este apartado es realizar una comparación entre los resultados arrojados por el modelo linealizado respecto a los obtenidos en el artículo de Liu et al [3] para el mismo escenario mediante la aplicación de algoritmo genético al problema original de minimización multiobjetivo. Al igual que se planteó en el caso de prueba anterior, puesto que el *makespan* se mueve en el rango definido entre las 272 y las 1.500 horas, se han fijado valores dentro del intervalo a la vez que se minimizaba el CO₂, obteniéndose los resultados de la *Tabla 48*:

<i>Datos Liu et al [3]</i>		<i>Modelo básico</i>	
<i>Makespan (h)</i>	<i>Emisiones (kg CO₂ e)</i>	<i>Makespan (h)</i>	<i>Emisiones (kg CO₂ e)</i>
501	2143,85	300	2065,335
548	2075,53	340	1844,75
554	1927,97	380	1664,985
591	1881,66	420	1559,01
603	1767,83	460	1462,455
639	1648,52	500	1386,31
720	1647,73	540	1319,585
726	1496,23	580	1256,785
749	1480,51	620	1193,985
763	1453,82	660	1135,11
781	1376,11	700	1075,45
817	1342,35	740	1020,5
832	1325,09	780	972,615
868	1317,24	820	941,215
898	1308,6	860	913,74
902	1297,63	900	886,265
903	1295,26	940	858,79
909	1238,73	980	838,38
951	1194	1020	817,97
962	1148,46	1060	798,345
1013	1113,14	1100	778,72
1081	1013,45	1140	758,31
1185	978,91	1180	738,685
1237	953,8	1220	718,275
1311	899,62	1260	699,435
1355	823,48	1300	679,81
1358	821,91	1340	660,185
1498	813,26	1380	641,345
		1420	621,72

Tabla 48. Resultados del algoritmo genético frente al modelo linealizado – Caso real.

En la *Figura 12* se representan los valores anteriores gráficamente, de manera que se facilita la comparación entre las soluciones obtenidas mediante cada uno de los modelos.

Nuevamente, al igual que ocurría para el caso de prueba, el modelo linealizado mejora los resultados del original, resuelto con algoritmo genético, al obtenerse soluciones que simultáneamente mejoran el *makespan* y las emisiones. La irregularidad en el trazado correspondiente a los resultados del artículo Liu et al [3] se debe a que es una representación gráfica de la población solución del algoritmo genético aplicado en ese caso. Estas soluciones no tienen por qué seguir una tendencia clara, como sí ocurre en el caso del modelo linealizado.

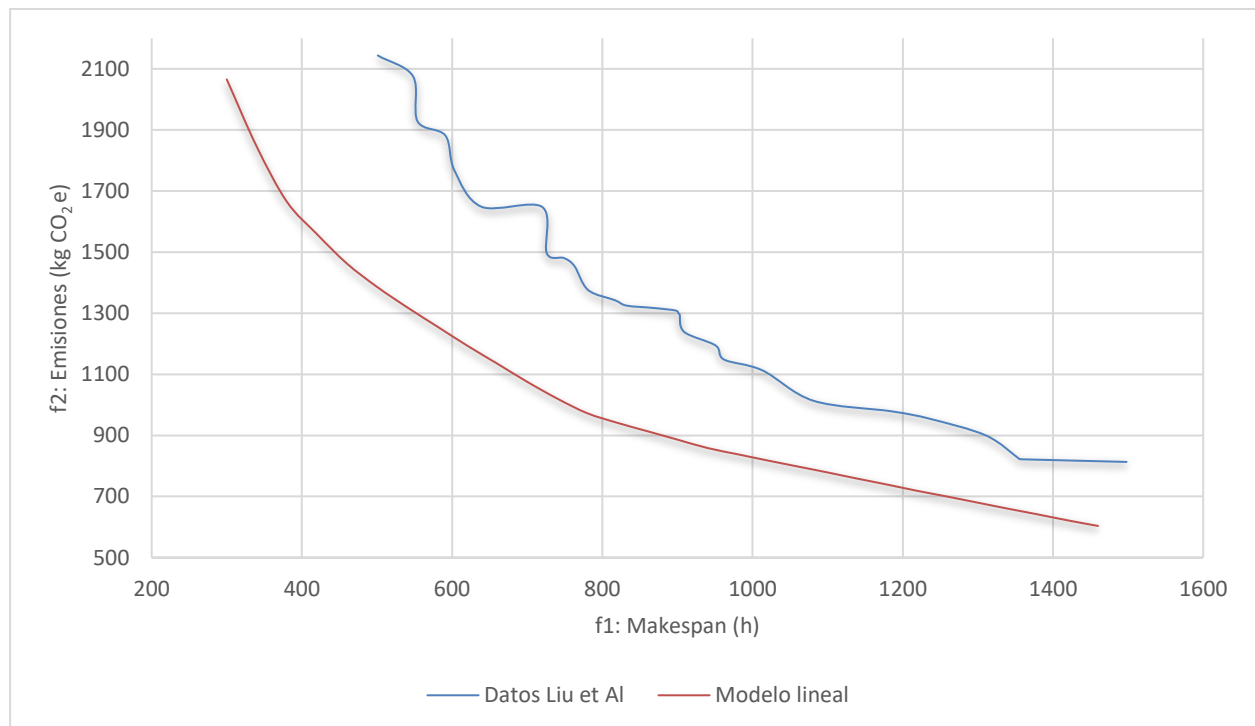


Figura 12. Comparativa gráfica del algoritmo genético frente al modelo linealizado - Caso real.

5.3.2 Modelo ampliado

En este apartado se muestran los resultados correspondientes al modelo ampliado propuesto en el apartado *Problema de optimización ampliado – Inclusión de coste total*. Con la inclusión de los costes correspondientes a cada origen posible, se realiza un estudio que se centra en minimizar únicamente el coste total resultante. Es decir, en este caso se trata de un problema de optimización con un único objetivo.

Sobre los costes considerados en la modelización matemática del problema se ha realizado un estudio de sensibilidad, que contabiliza las variaciones producidas y el efecto en las soluciones ante un incremento de cada coste según su naturaleza. Igualmente se ha llevado a cabo un análisis gráfico detallado de la distribución de costes. Es decir, se especifica para cada tipología de coste cuánto representa su valor sobre el total de coste obtenido como solución del problema de optimización.

5.3.2.1 Caso prueba

En primer lugar, se muestran en esta sección los resultados obtenidos para el caso de prueba mediante la aplicación del modelo ampliado desarrollado. Imponiendo la reducción de los costes totales como objetivo del problema de optimización, se consigue reconfigurar la planta por un total de 541 u.m, siendo el *makespan* asociado a este escenario de un total de 286 horas y con unas emisiones de 744 kg CO₂e.

De las 541 u.m. de coste en que se incurre, sólo 82 son relativas al entrenamiento de los trabajadores. El coste de set-up entre etapas asciende a las 52 u.m, mientras que el mayor peso se lo llevan el coste por uso de la instalación, de 201 u.m, y los de consumo energético, de unas 206 u.m.

$$\text{Makespan} = 286 \text{ h}$$

$$\text{Emisiones CO}_2 = 744 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{Tiempo de computación} = 0,04994 \text{ segundos}$$

$$\text{Coste total} = 541 \text{ u. m.} \left\{ \begin{array}{l} \text{Coste}_{ent} = 82 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{set-up} = 52 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{inst} = 201 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{energía} = 206 \text{ u. m.} \end{array} \right.$$

En la *Tabla 49* se recogen las unidades de demanda de cada producto cuya asignación minimiza los costes totales a la vez que cumple la demanda requerida de cada tipo de producto:

		SERU							Demanda
		1	2	3	4	5	6	7	
PRODUCTO	1	20							20
	2		18		16		36		70
	3			31	9				40
	4					30			30

Tabla 49. Uds de producto – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.

En la *Tabla 50*, por el contrario, se muestran los tiempos de procesado individuales que supone la fabricación de la demanda de cada uno de los productos, así como las emisiones de dióxido de carbono en que se incurren por dicha fabricación:

PRODUCTO	Tiempo de procesado (h)	CO ₂ emitido (kg CO ₂ e)
1	20	141,30
2	144	222,94
3	63	215,88
4	60	164,85

Tabla 50. Tiempo máximo y emisiones – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.

Puesto que en este problema se introdujo la asignación de trabajadores como una nueva variable de decisión, en

la *Tabla 51* se han detallado los resultados obtenidos. Puede comprobarse que, para cada etapa de la producción, que se corresponde con cada uno de los productos, no se tiene nunca al mismo trabajador en más de un serú, ya que esto significaría que el trabajador participa en la fabricación del producto correspondiente a la etapa empleando más de un serú, algo que se encuentra restringido en el modelado del problema. Es decir, tal como se comentó en el planteamiento de este modelo, cada trabajador está únicamente asignado a un serú durante cada etapa de producción.

Además, cuando se asigna un trabajador a un serú para fabricar un producto, él es el único trabajador que está empleando ese serú en dicha etapa de fabricación, al tratarse de serus tipo *Yatai*. Esto es algo que también puede comprobarse en los resultados arrojados en la *Tabla 51*, ya que, para cada producto, vemos que no se asigna el mismo serú a más de un trabajador.

También puede verse que, en cada etapa de fabricación, hay trabajadores que quedan sin asignar a ningún serú, ya que hemos dejado libre este aspecto, sin forzar en ningún momento que todos los trabajadores tengan que estar operando a la vez. El motivo de no restringir esto se basa en que queremos que la optimización busque siempre la minimización de costes en la mayor medida de lo posible.

		TRABAJADOR			
		1	2	3	4
PRODUCTO	1	Seru 1			
	2		Seru 2	Seru 6	Seru 4
	3		Seru 3	Seru 2	
	4	Seru 4			

Tabla 51. Distribución de trabajadores – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.

En la *Figura 13* se ha representado gráficamente la evolución temporal que se tendría en este escenario, con las demandas de cada tipo de producto asociadas a cada uno de los serus.

Puede comprobarse a simple vista que existen serus que quedan sin asignar a ningún producto en todo el proceso de producción entero. En concreto, el serú 5 y el 7 nunca son elegidos para ninguno de los productos, y esto es debido a que su selección implicaría un aumento significativo de los costes totales, parámetro que tratamos de minimizar en este escenario.

Si se consultan los datos de partida, puede comprobarse que existen tres factores por los cuales los serus 5 y 7 implicarían un incremento en el coste total:

- Altos costes de entrenamiento. El gasto asociado para formar a los trabajadores disponibles en las tareas requeridas por los serus 5 y 7 para la obtención de productos es más elevado que para el resto.

- Tiempos de procesado prolongados. El tiempo requerido por estos serus para producir en su totalidad una unidad de producto es mayor que en el resto. Esto implica que se incurre durante mucho más tiempo en los costes por hora de uso de las instalaciones, razón por la que la optimización del problema esquiva la asignación de productos a estos serus.

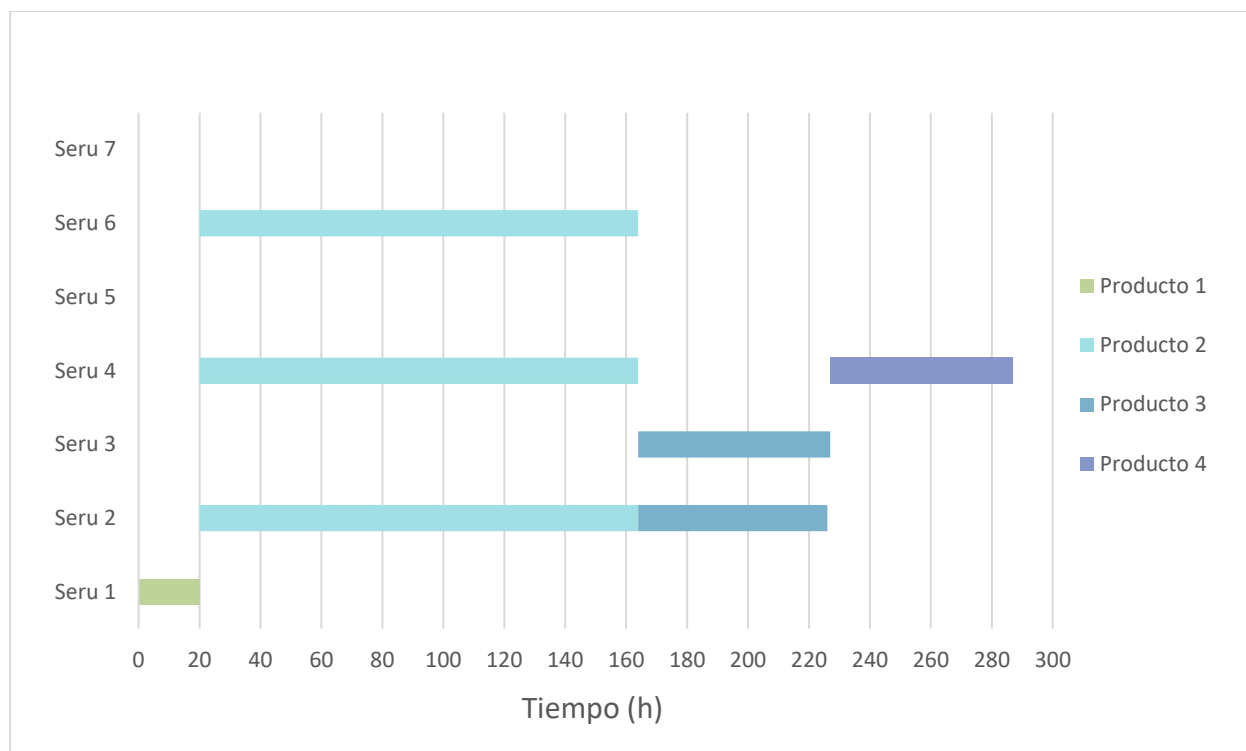


Figura 13. Distribución de productos por serus – Modelo ampliado – Caso de prueba – Minimización coste total.

5.3.2.2 Caso real

Para el caso de aplicación del modelo ampliado al escenario real, los costes resultan incrementados respecto al caso anterior al tratarse de un total de 10 productos a fabricar en lugar de 4. En concreto, se obtienen unos costes totales de 1.433 u.m, mientras que el *makespan* pasa a ser de 640 horas, frente a las 286 del caso anterior. Con respecto a las emisiones de CO₂, se tienen 1.748 kg CO₂ e, nuevamente un valor más elevado al estarse produciendo un mayor número de elementos.

La distribución de costes según el origen de los mismos sigue una pauta muy similar a la del caso de prueba. Del total de 1.433 u.m, el coste que menor impacto tiene vuelve a ser el de set-up, con un valor de 104 u.m. Seguido de éste, se encuentran los costes de entrenamiento, al igual que ocurría en el caso anterior, esta vez con un valor de 396 u.m. Por su parte, los costes por uso de las instalaciones ascienden a las 449 u.m, mientras que el consumo energético supone un gasto de 484 u.m. Nuevamente, son estas dos causas las que suponen un mayor impacto en el coste final obtenido.

$$\text{Makespan} = 640 \text{ h}$$

$$\text{Emisiones } CO_2 = 1.748 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{Tiempo de computación} = 0,07809 \text{ segundos}$$

$$\text{Coste total} = 1433 \text{ u. m.} \left\{ \begin{array}{l} \text{Coste}_{ent} = 396 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{set-up} = 104 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{inst} = 449 \text{ u. m.} \\ \text{Coste}_{energía} = 484 \text{ u. m.} \end{array} \right.$$

En la *Tabla 52* se presentan las unidades de producto que han sido asignadas a cada uno de los serus, comprobándose como ha venido haciéndose en todos los casos expuestos hasta ahora que la demanda establecida para cada tipo de producto es satisfecha de forma exacta en todos ellos. Cada uno de los serus asociados a un producto tendrá su propio trabajador.

		SERU						Demanda
		1	2	3	4	5	6	
PRODUCTO	1	20						20
	2		14	41	15			70
	3	32		8				40
	4		9		21			30
	5				17	3		20
	6		14			16		30
	7	20						20
	8			30				30
	9		7				33	40
	10	20						20

Tabla 52. Uds de producto – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.

Por su parte, los tiempos de procesado correspondientes al total de la demanda de cada producto, así como las emisiones de dióxido de carbono que esto supone, se detallan en la *Tabla 53*. Puede comprobarse que se cumplen todas las restricciones impuestas en cuando a fechas de entrega de cada tipo de producto, así como de emisiones permitidas en cada uno de ellos.

PRODUCTO	Tiempo de procesado (h)	CO ₂ emitido (kg CO ₂ e)
1	20	125,60
2	126	303,01
3	64	238,64
4	63	209,60
5	34	122,46
6	128	59,66
7	20	141,30
8	60	188,40
9	66	218,23
10	60	141,3

Tabla 53. Tiempo máximo y emisiones – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.

En la *Tabla 54* se detalla cuáles han sido los trabajadores que van a formar parte de la fabricación de cada uno de los productos y qué serú emplearán para llevar a cabo sus tareas en cada etapa de la producción:

		TRABAJADOR										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PRODUCTO	1	Seru 1										
	2	Seru 2	Seru 4								Seru 3	
	3							Seru 3	Seru 1			
	4					Seru 2	Seru 4					
	5					Seru 5				Seru 4		
	6	Seru 5			Seru 2							
	7							Seru 1				
	8						Seru 3					
	9					Seru 6					Seru 2	
	10	Seru 1										

Tabla 54. Distribución de trabajadores – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.

Vemos que, nuevamente, ningún trabajador va a participar en más de un serú durante una misma etapa de producción, ya que los intercambios de materiales y recursos, así como de la mano de obra, entre serús que funcionan de manera simultánea está restringida en las ecuaciones del modelado matemático planteado. Del mismo modo, tampoco se da el caso de que más de un trabajador esté asociado al mismo serú durante la fabricación de un producto concreto, puesto que en todo momento tratamos de serús tipo *Yatai*.

En la *Figura 14* se representa gráficamente la distribución temporal de productos por serús, en la que puede verse cómo se trabaja de manera secuencial, no empezándose con un producto hasta la finalización del anterior:

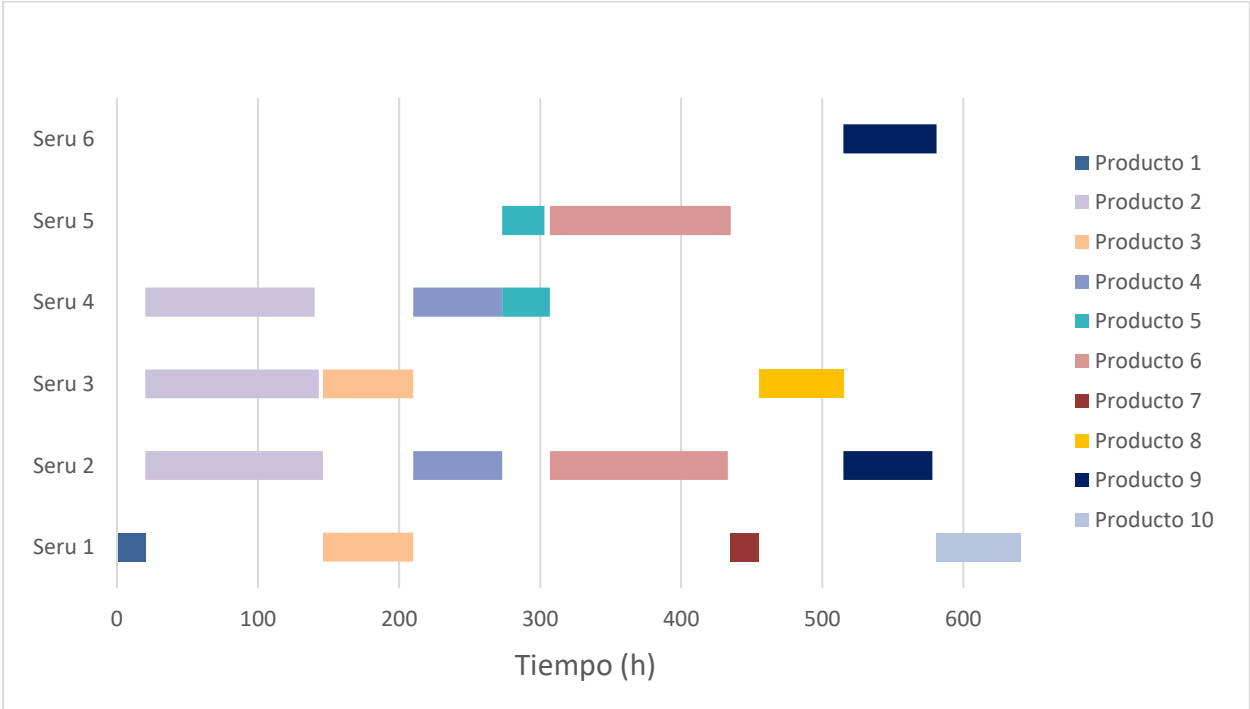


Figura 14. Distribución de productos por serús – Modelo ampliado – Caso real – Minimización coste total.

Analizando dicha gráfica, podemos comprobar que en este caso sí que se asignan todos los serus disponibles en algún momento de la producción, ya que la mayor variedad de productos provoca que siempre exista un seru más apropiado para su obtención que para la de los otros.

Se observa que la mayor parte del *makespan* es empleado en los productos 2 y 6, mientras que el resto de los productos requieren de mucho menos tiempo para finalizar la fabricación de sus unidades demandadas. En el caso del producto 2, esta necesidad de tiempo radica en que es el producto más demandado de todos, con un total de 70 unidades a fabricar. Por eso, a pesar de emplear 3 serus trabajando en paralelo, el tiempo para finalizar toda su producción es tan significativo.

Por su parte, el producto 6 tiene una demanda del orden del resto de productos, con un total de 30 unidades. Sin embargo, el tiempo de procesado asociado en sus serus seleccionables que menor consumo energético tienen es muy alto. Por tanto, la solución del problema, tendiendo a minimizar los costes energéticos, asocia las unidades demandadas de producto 6 a los serus 2 y 5, lo que, aun suponiendo un mayor tiempo de procesado, tiene un menor impacto económico que el incremento de consumo energético que supondría asociarlo a sus otros serus.

5.3.2.2.1 Frontera de Pareto: Emisiones CO₂ vs Coste total

En la *Figura 15* de este apartado se ha representado la frontera de Pareto relativa al coste total y a las emisiones de dióxido de carbono que se obtienen en el caso real tras haber aplicado el modelo ampliado planteado en este proyecto:

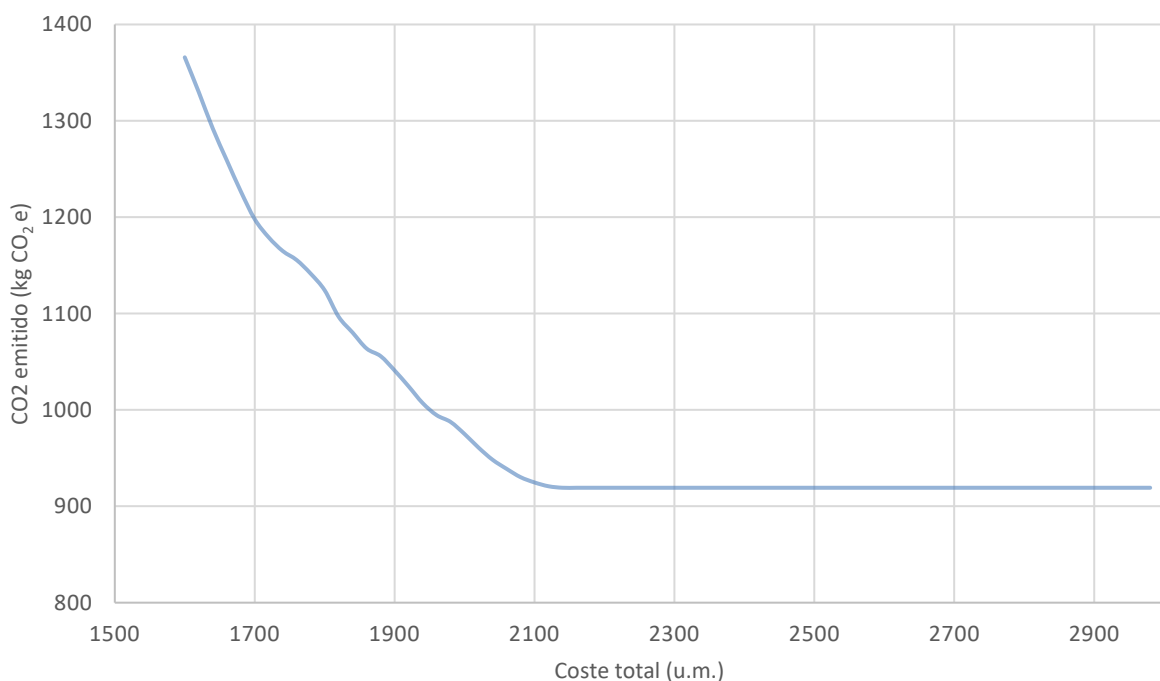


Figura 15. Frontera de Pareto: Emisiones CO₂ frente a coste total.

La obtención de esta representación gráfica se ha llevado a cabo fijando el coste total en valores que hemos comprobado en los apartados anteriores que puede tomar este parámetro. Dejando fijo dicho valor, se ha minimizado el dióxido de carbono y se ha ejecutado el modelo.

En concreto, se ha hecho oscilar el coste total entre las 1.600 y las 3.000 u.m, obteniéndose soluciones diferentes para cada uno de los valores intermedios evaluados.

De esta representación se pueden sacar dos conclusiones principales sobre el problema de reconfiguración de líneas de montaje en sistemas de producción Seru Seisan:

- Como era de esperar, el coste total y el impacto medioambiental son variables reñidas entre sí. Una reducción de los costes de producción siempre implica que las emisiones de CO₂ van a aumentar, puesto que los procesos tecnológicos que han sido optimizados para reducir la contaminación siempre son más caros de implementar y utilizar. Por esta razón se tiene una curva cuya forma se aleja de un eje cuanto más se aproxima al otro.
- Las emisiones de CO₂ tienen un mínimo situado en torno a los 920 kg CO₂ e que no somos capaces de mejorar por mucho que estemos dispuestos a incrementar el coste de producción. Es decir, una vez conseguido reducir las emisiones de dióxido de carbono a los 920 kg, algo que se da en torno a las 2.150 u.m. de coste total, no tiene sentido incrementar el coste de producción con intención de reducir el impacto en el medio ambiente, puesto que las emisiones de dióxido de carbono obtenidas seguirán sin bajar de dicho valor. Esto se observa en la curva anterior por el hecho de que a partir de las 2.150 u.m. aproximadamente, la tendencia sigue una horizontal perfecta.

5.3.2.2.2 Análisis de sensibilidad de costes

El objetivo de este apartado es realizar un análisis de sensibilidad sobre los costes que se han tenido en cuenta en el modelado planteado en el apartado *Problema de optimización ampliado – Inclusión de coste total*. El interés de este análisis radica en ser capaces de averiguar la repercusión que tiene en los costes totales de producción un incremento determinado en cada uno de los tipos de costes por separado.

De esta forma, podemos obtener información sobre cómo afectaría a nuestra solución el hecho de que los costes de entrenamiento pasasen a ser mayores por un cambio de acuerdo con las entidades de formación contratadas para esta labor, por ejemplo.

Del mismo modo, nos sirve como análisis de un escenario en el que se produjese un aumento del precio de la electricidad, con su correspondiente incremento de coste para nuestro proceso de producción. En este escenario, el coste por consumo energético tomaría un papel incluso más relevante que el que ya tiene.

También nos sirve para estudiar el caso en el que los costes por uso de instalación aumentasen por una determinada razón, como podría ser una subida en los alquileres, que podrían ser tanto del local empleado como taller, así como de determinados equipos que nuestra empresa no posee en propiedad y que forman parte de los recursos disponibles en los serus.

Finalmente, se puede ver también el efecto que tendría una subida en los costes de set-up correspondientes al montaje de un seru para la obtención de un determinado producto, si bien este tipo de incrementos son menos probables dado que dependerían únicamente del proceso de montaje estipulado por nosotros mismos para la configuración de cada seru.

Para la realización de este análisis, el proceso seguido ha consistido en fijar las emisiones de CO₂ en valores comprendidos en el rango definido entre los 950 y los 1.700 kg. Con este valor fijo, se ha aplicado minimización de costes totales para diferentes alternativas que van variando un único coste específico cada vez.

5.3.2.2.1 Coste de entrenamiento

En la *Figura 16* se han representado los costes totales y las emisiones de dióxido de carbono para distintos casos en los que la única diferencia en los datos de partida son los costes de entrenamiento. En concreto, la serie de datos etiquetada como “Original” se corresponde con los costes de entrenamiento mostrados en el apartado de datos de partida, mientras que el resto son los casos en los que estos costes han sido multiplicados por un factor que los incrementa:

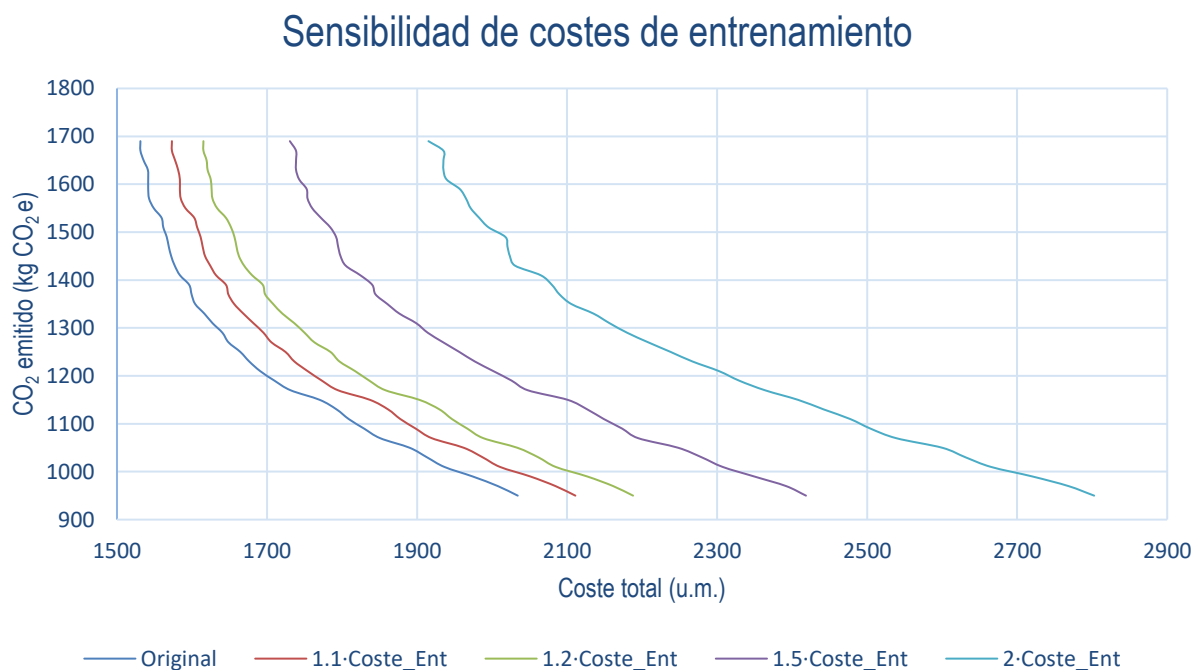


Figura 16. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de entrenamiento.

Del análisis realizado sobre la gráfica anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Un incremento en los costes de entrenamiento supone un aumento considerable en los costes totales. En concreto, para el caso de menor emisión de dióxido de carbono, se puede observar que un aumento del 50% en los costes de entrenamiento supone que el coste total pase de valer 2.034 a 2.418 u.m, o lo que es lo mismo, un incremento de un 18,88%. Este incremento es constante para cualquier nivel de CO₂, puesto que no existe relación entre el coste de entrenamiento y las emisiones.
- Dicho porcentaje de efecto sobre el coste total disminuye ligeramente conforme subimos el aumento de los costes de entrenamiento. Por ejemplo, cuando los costes de entrenamiento aumentan un 50% más respecto al coste original, y tenemos el coste de entrenamiento multiplicado por 2, el coste total resultante pasa de valer 2.418 a 2.802 u.m, es decir, que tiene un efecto del 15,88% en el coste total.
- También se observa que cuanto mayor es el incremento en los costes de entrenamiento, más irregular es la curva correspondiente a las soluciones obtenidas. Es decir, a mayor incremento en los costes de entrenamiento, más inestable es la tendencia y pueden producirse variaciones más bruscas entre una solución y la anterior.

5.3.2.2.2 Coste de consumo de energía

En la *Figura 17* se muestran los resultados del proceso análogo al descrito en el apartado anterior, pero en este caso modificando mediante el factor de aumento los costes correspondientes al consumo de la energía eléctrica:

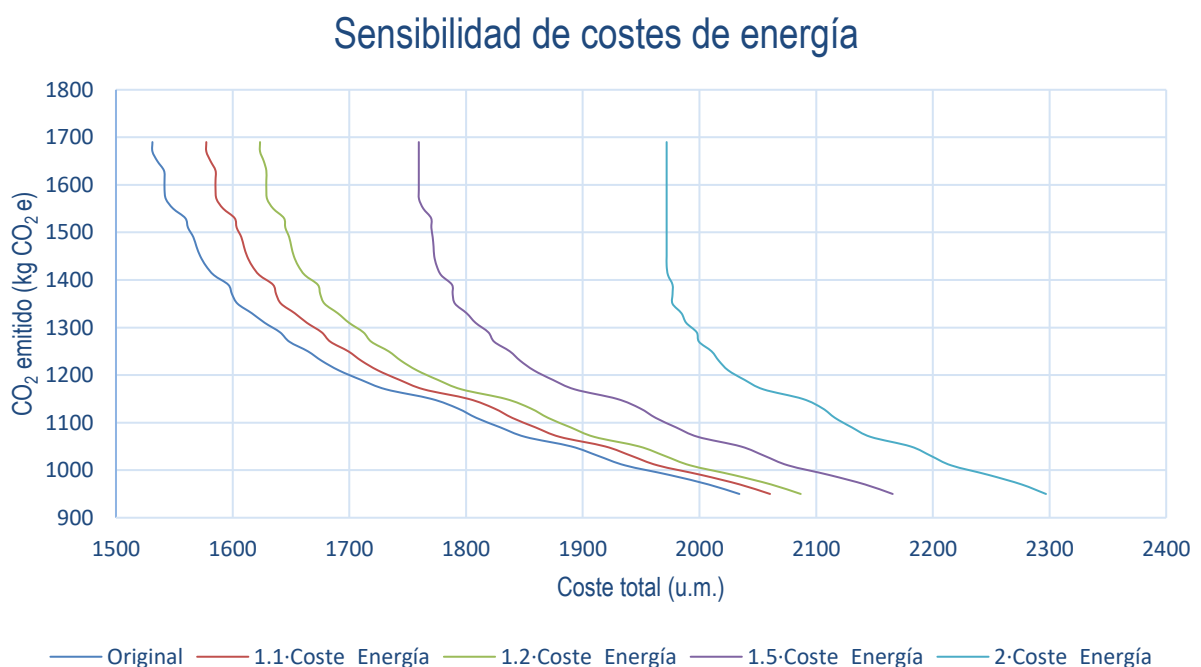


Figura 17. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de la energía.

La visualización conjunta de los resultados que se han obtenido para los casos analizados nos permite obtener las siguientes conclusiones:

- El incremento definido en los costes de consumo de energía produce un aumento del coste total según el factor empleado. En concreto, si analizamos el caso de menores emisiones de dióxido de carbono, se comprueba que un incremento del 50% en el coste de la energía implica que el coste total aumente desde las 2.034 a las 2.165 u.m, que representa un incremento del 6,44%.
- Para incrementos mayores en el coste de la energía, como por ejemplo el caso en el que se ha subido un 50% más dicho coste respecto al coste original, y se tiene el coste de la energía inicial multiplicado por 2, los resultados obtenidos hacen que el coste total pase de valer 2.165 a 2.296 u.m. Es decir, un incremento del 6,05%. Con esto se confirma que el porcentaje de aumento del coste total es aproximadamente constante cuando vamos subiendo el factor que aplicamos sobre los costes de energía.
- También se observa que, cuanto mayor es el coste de la energía, más grande es el intervalo de emisiones de dióxido de carbono para el cual el coste total es constante. Esto se refleja de manera muy fácil de observar en la representación correspondiente al aumento del coste de la energía con un factor de 2. En este caso, existe una línea vertical a la altura de las 1.970 u.m. aproximadamente. Esta línea vertical indica que existe un gran intervalo de valores de emisiones de CO₂ para el cual el coste total se mantiene siendo el mismo. Es decir, que existen múltiples soluciones que arrojan el mismo valor de coste total, pero con diferentes niveles de emisiones.
- También resulta de interés señalar que, para los casos con bajas emisiones, la diferencia en el incremento de costes es menor que para aquellos en los que existen grandes niveles de CO₂. Esto se refleja por el hecho de que las curvas están más separadas en la zona superior que en la inferior. Esto es debido a que los niveles de CO₂ y el consumo energético están intrínsecamente relacionados. El coste asociado al consumo de energía viene de la multiplicación del gasto energético, kWh, por el coste unitario de la energía corregido con un factor. Por su parte, las emisiones de dióxido de carbono provienen igualmente del consumo de energía, pero esta vez multiplicado por un factor que cuantifica los kg de CO₂ emitidos por cada kWh de energía consumidos. Puesto que ambos términos son dependientes del consumo energético, resulta lógico que, a mayor nivel de emisiones permitido, mayor sea el incremento del coste.

5.3.2.2.3 Coste de instalación

En la *Figura 18* se representan los valores obtenidos después de aplicar el mismo estudio de los apartados anteriores, pero esta vez actuando con el factor de incremento sobre los costes asociados al uso de las instalaciones y recursos:

Sensibilidad de costes de instalación

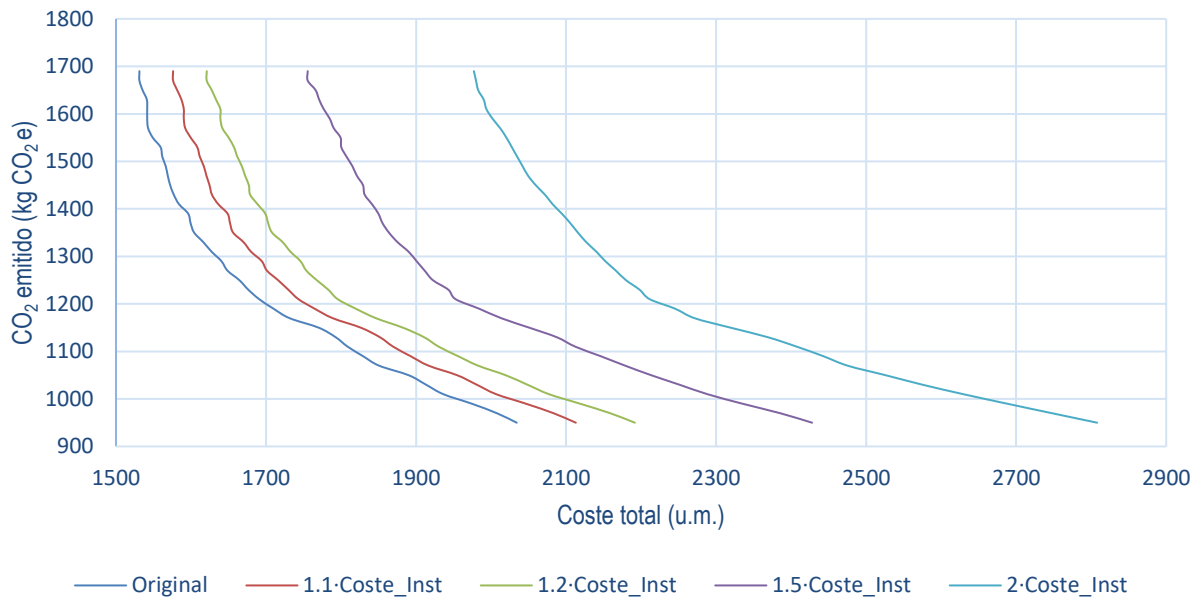


Figura 18. Análisis de sensibilidad – Variación de los costes de instalación.

Se observa que el comportamiento es muy similar al que se tenía en el caso de los costes de entrenamiento. En concreto, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El aumento de los costes asociados al uso de las instalaciones supone un incremento del coste total, de modo que, si volvemos a fijarnos en el caso de menores emisiones de CO₂, podemos comprobar el porcentaje de dicho incremento. En concreto, el caso original tenía asociados unos costes totales de 2.034 u.m, mientras que al aplicarle un incremento del 50% a los costes de instalación, los totales se sitúan en torno a las 2.428 u.m. Esto supone un aumento del 19,37%.
- Si volvemos a aplicar un incremento del 50% más sobre los costes originales de set-up, es decir, que los tenemos multiplicados por 2, los costes totales toman un valor de 2.808 u.m, lo que implica un aumento del 15,65% respecto al caso anterior. Es decir, el porcentaje de aumento de los costes totales disminuye ligeramente, aunque sigue siendo del mismo orden, conforme nos alejamos del caso original.
- Existe una ligera relación entre las emisiones de CO₂ y el incremento de los costes totales que se refleja en el hecho de que las curvas están más separadas por la zona superior que por la inferior. Los costes de instalación están directamente relacionados con el tiempo de producción, ya que representan un coste por cada hora que se emplean las instalaciones. Esta relación observada indica que cuanto mayor es el nivel de emisiones permitido, mayor es el incremento del coste asociado al uso de las instalaciones.

5.3.2.2.4 Coste de set-up

En la *Figura 19* se han representado los valores de las soluciones obtenidas en el caso en el que los costes a los que se aplica el factor de aumento son los de set-up:

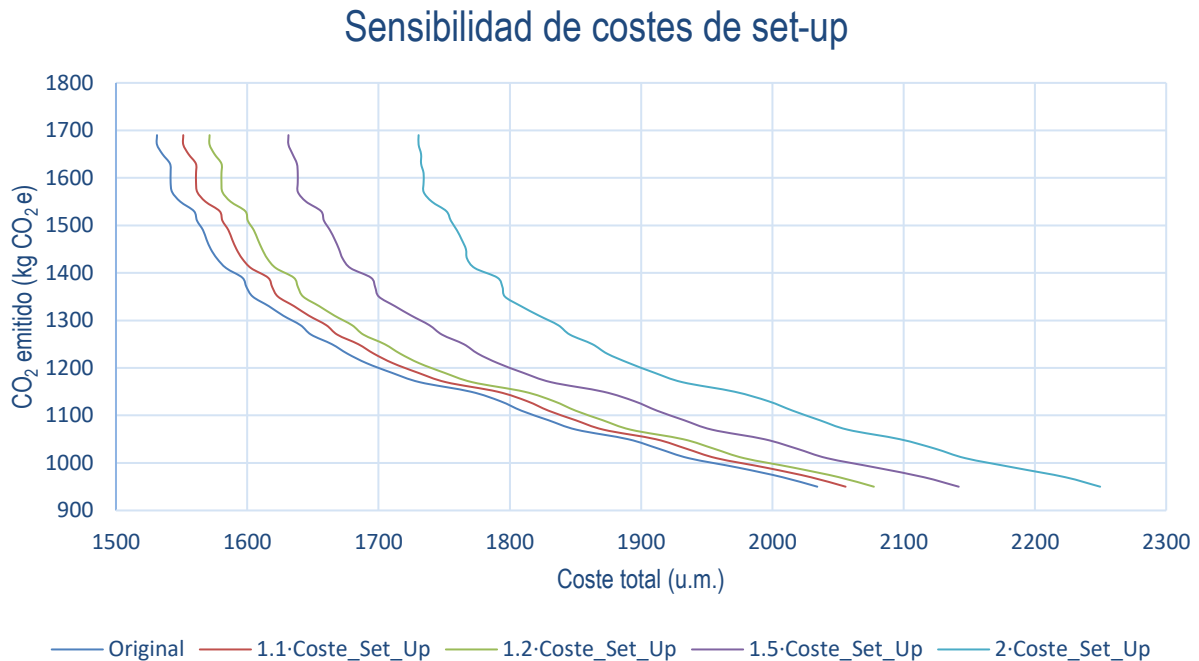


Figura 19. Análisis de sensibilidad – Variación del coste de set-up.

Observando esta imagen, podemos determinar que el comportamiento se parece más al que presentaban los costes de energía que al resto. Las principales conclusiones que pueden extraerse son las siguientes:

- Un incremento en los costes de set-up supone un aumento del coste total que es directamente proporcional al factor aplicado. Si tomamos como ejemplo nuevamente el caso de menor emisiones de CO₂, para un incremento del 50% en el coste de set-up, vemos que los costes totales pasan de ser 2.034 a ser 2.142 u.m. Esto implica un aumento de un 5,31% respecto al coste original.
- Si aplicamos un aumento de un 50% más a los costes de set-up, teniéndolos al igual que en casos anteriores multiplicados por 2 los costes originales, se observa que el coste total pasa a valer 2.250 u.m, lo que significa un incremento del 5,04%. Esto indica que, al igual que para el resto de los costes estudiados, el aumento del coste total es proporcional al factor de incremento aplicado para modificar los costes de set-up.
- También se observa una separación de las curvas ligeramente superior en las zonas altas de la gráfica, lo que indica que, para valores altos de emisiones, el impacto en el coste total resulta más significativo.

5.3.2.2.3 Análisis de la distribución de tipos de costes

En el presente apartado se ha llevado a cabo un estudio de los costes obtenidos en el caso real original, es decir, sin aplicación de factores incrementales a ninguno de los costes individuales, y habiendo aplicado el modelo ampliado de minimización de coste total para un rango de valores que se representa en la *Figura 20*.

En concreto, para la obtención de este gráfico se han fijado las emisiones de CO₂ en cada uno de los valores mostrados en el eje horizontal. Una vez fijado el nivel de CO₂ a cada uno de estos valores, se ha llevado a cabo la minimización de los costes totales mediante la aplicación del modelo ampliado. De la solución arrojada por la optimización del modelo, se han ido registrando qué porción de dicho coste total correspondía con cada tipo de coste individual.

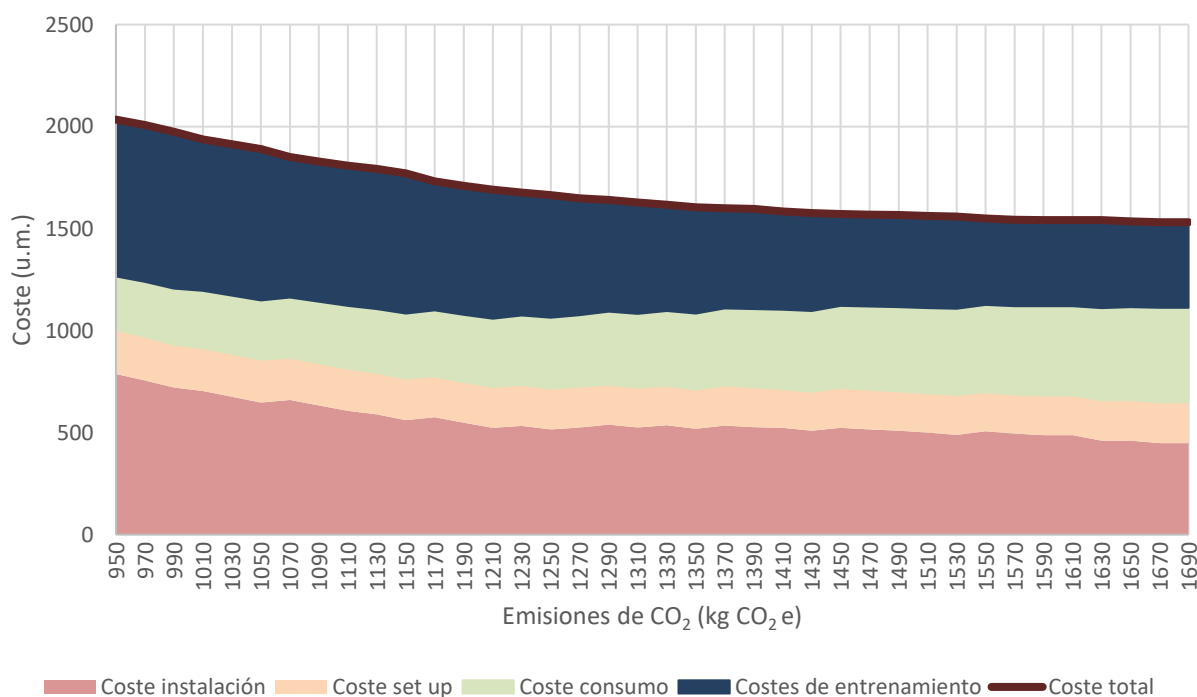


Figura 20. Reparto de tipos de costes.

De esta representación se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Ninguno de los costes considerados en este estudio es despreciable o puede ignorarse. Esto se debe a que las 4 tipologías de costes analizadas tienen una presencia notable en el total obtenido para el coste de producción.
- El coste total disminuye conforme aumenta el nivel de emisiones de CO₂ permitido. Este hecho constituye algo que ya habíamos corroborado anteriormente con otro tipo de análisis realizados sobre los resultados.

- El coste correspondiente al entrenamiento de los trabajadores disminuye conforme aumenta el nivel de CO₂ permitido. Esto es debido a que, conforme se va relajando la condición de las emisiones, empiezan a ser posibles combinaciones seru-producto-trabajador que previamente no lo eran y que permiten seleccionar operarios cuyo coste de entrenamiento para las tareas correspondientes a dicho producto en ese seru son menores.
- El coste del consumo energético aumenta cuanto mayores son las emisiones de dióxido de carbono. Esto se debe a que ambos parámetros están directamente relacionados, como ya se pudo comprobar en el análisis de sensibilidad realizado sobre el coste del consumo energético. Por un lado, las emisiones de dióxido de carbono se calculan de manera directamente proporcional a los kWh de energía consumidos en los procesos de producción. Por otro lado, el coste del consumo energético es, por definición, lo que pagamos por cada kWh de energía consumido. Existe una relación necesaria en la que, cuando el valor de las emisiones de dióxido de carbono aumenta, el coste energético también va a hacerlo.
- Puesto que el coste de consumo energético aumenta con las emisiones de CO₂ tal como se ha comentado en el punto anterior, mientras que el coste total disminuye, se concluye que el porcentaje del coste total que representa el consumo energético aumenta drásticamente. Es decir, cuanto mayor es el CO₂ emitido, más peso tiene el coste energético frente al resto de costes.
- Los costes de set-up permanecen aproximadamente estables de manera independiente al aumento de las emisiones. Esto es porque no existe una relación como tal entre lo que cuesta reconfigurar un seru u otro para realizar un producto respecto a lo que se emite de CO₂ al ambiente. Por esta razón, el valor de los costes de set-up es muy parecido en todos los casos analizados en este apartado.
- Finalmente, se observa que los costes de instalación disminuyen con una tendencia muy similar a la del coste total. Esto se debe a que, cuando se permite un aumento en las emisiones de CO₂, se habilitan numerosas combinaciones seru-producto para minimizar el coste que antes no estaban disponibles debido a que su nivel de contaminación era demasiado alto.

6 CONCLUSIONES

Los sistemas de producción Seru Seisan permiten afrontar el desafío de hacer frente a demandas de alta variabilidad y volumen fluctuante de manera eficiente y sostenible. La situación actual del mercado marca la forma en que los sistemas de producción deben enfocar el planteamiento de sus procesos de fabricación y montaje, y Seru Seisan, surgido en el contexto de las necesidades causadas en Japón tras la explosión de la burbuja económica, ofrece una solución de alto rendimiento que, además de suponer un bajo coste de inversión, cumple con todos los objetivos impuestos por la sostenibilidad, tanto desde el punto de vista medioambiental como social.

Con motivo de la extensión de este sistema de producción, surge el modelo matemático planteado por Liu et al [3], que se ha resuelto en el presente proyecto mediante la herramienta de optimización Gurobi en lenguaje Python, resolviendo un modelo linealizado que mejora los resultados arrojados por el algoritmo genético empleado en el artículo.

Durante el estudio de este modelo, se ha comprobado que se puede incorporar el concepto de sostenibilidad de dos modos independientes: mediante el tiempo total de producción (*makespan*) y las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera asociadas a la elaboración de la totalidad de una demanda prefijada. Aun tratándose de objetivos contrapuestos, la elaboración de la frontera de Pareto nos muestra que existen soluciones que permiten obtener valores razonables para ambos parámetros en la reconfiguración del sistema.

En la resolución de este problema, se han obtenido los valores numéricos específicos de unidades de producción que deben ser elaboradas en cada uno de los serus posibles, por lo que no sólo se lleva a cabo la asignación seru-producto, sino que queda perfectamente definida la distribución de la producción. Esto se ha llevado a cabo tanto para un caso de prueba, con un reducido número de productos diferentes, como para otro realista, en el que la variedad de los productos era mayor.

Por otro lado, con el objetivo de no perder de vista el coste, se ha elaborado un modelo matemático totalmente nuevo en el que el coste es la variable fundamental a minimizar, con un enfoque que permite incorporar todos los conceptos de sostenibilidad empleados en el modelo anterior y, a su vez, optimizar la reconfiguración del sistema desde el punto de vista económico en la medida de lo posible.

En este apartado, se ha llevado a cabo un estudio de la relación existente entre el coste total y el impacto medioambiental resultante, así como un análisis de sensibilidad de cada una de las variables pertenecientes a cada tipo de coste. Del mismo modo, se ha representado la evolución de la proporción de cada tipo de coste sobre el total obtenido en función de distinta permitividad en la contaminación, concluyéndose la relación de cada uno de los parámetros económicos individuales con las emisiones de dióxido de carbono.

Por último, en los anexos adjuntos al final de este documento, apartado Anexos, se proporciona al lector el código de programación empleado para la optimización de ambos modelos, con el objetivo de facilitar un instrumento mediante el que puede realizar todas las simulaciones y estudios que se desee proporcionándole los datos de entrada oportunos mediante las estructuras de datos de partida descritas en los apartados Datos de partida del modelo básico y Datos de partida del modelo ampliado.

7 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Tras el planteamiento del modelo ampliado cuya fijación es la minimización del coste total, resultaría de interés incorporar más variables que tuvieran en cuenta otro tipo de parámetros asociados a la producción. Por ejemplo, podría incorporarse mediante restricciones la necesidad de que todos los trabajadores fuesen siempre elegidos para alguna tarea en cada etapa del proceso.

Otra opción sería incorporar el coste por cada hora de trabajo asignado a cada uno de los trabajadores. En caso de ser distinto este coste entre un trabajador y otro, podría introducir modificaciones en las soluciones obtenidas, seleccionándose un trabajador que, aunque requiera un mayor coste de entrenamiento, supone un menor coste asociado a su remuneración que otro trabajador.

Igualmente, podrían suprimirse algunas de las hipótesis de partida asumidas, como por ejemplo la que estipula que cualquier trabajador tarda las mismas horas en realizar una tarea en un seru determinado que el resto de los trabajadores. Si se mide la eficiencia de cada trabajador en cada tipo de tarea, éste puede ser un parámetro interesante a incorporar en el modelo, de forma que se tienen en cuenta las diferencias en las habilidades de cada tipo de los trabajadores.

También podría realizarse un modelo en el que los serus no tuvieran por qué ser de tipo *yatai*, permitiendo al proceso de optimización asignar más de un trabajador por seru, y decidiéndose a posteriori si los serus con más de un empleado responderían al tipo divisional o rotativo mediante un análisis específico de la solución arrojada por el programa.

Finalmente, tras haber centrado este proyecto en la sostenibilidad ambiental mediante el estudio de las emisiones de dióxido de carbono, el consumo energético o el tiempo de producción, sería de gran utilidad indagar en otros aspectos relacionados con la sostenibilidad económica y social. Aunque la sostenibilidad económica ya está considerada de forma evidente en el modelo ampliado, los parámetros relacionados con la sostenibilidad social requerirían un profundo análisis debido a la dificultad de modelado de los mismos, pero aportarían un gran valor al incrementar la relevancia del factor humano en el modelado matemático.

8.1 Código Python modelo original linealizado

```
# -*- coding: utf-8 -*-
""" MODELO SOSTENIBILIDAD - BÁSICO LINEALIZADO """

from gurobipy import quicksum
from gurobipy import GRB
from gurobipy import Model
from math import ceil
import xlrd
import xlwt

# Modelo del trabajo
m = Model("Seru Seisan")

# Datos caso de prueba
workbook=xlrd.open_workbook("1_Datos_prueba.xls")

# Datos caso real
#workbook=xlrd.open_workbook("4_Datos_caso_real.xls")

# Carga de hojas de Excel de partida
sheetIni = workbook.sheet_by_name("Datos iniciales")
sheetSerSelec = workbook.sheet_by_name("Serus seleccionables")
sheetDemanda = workbook.sheet_by_name("Demanda")
sheetCO2 = workbook.sheet_by_name("Limite CO2")
sheetTiempo = workbook.sheet_by_name("Tiempo procesado")
sheetEnergia = workbook.sheet_by_name("Energia")
sheetDT = workbook.sheet_by_name("Makespan")

# Carga de datos de partida
N_Serus=int(sheetIni.cell(1, 2).value)
N_Productos=int(sheetIni.cell(2, 2).value)
Deadline=float(sheetIni.cell(3, 2).value)
Emission=float(sheetIni.cell(4, 2).value)
N_Trabajadores=int(sheetIni.cell(5,2).value)

# Variables, formato lista y diccionario
Sp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
```

```

Qp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Ep=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Tp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Zp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
CO2e=[0 for p in range(1,N_Productos+1)]
DT=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
tps={}
cps={}
Xps={}
Qps={}

# Listas iterables para usar en los bucles
Productos=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Serus=[s for s in range(1,N_Serus+1)]

#%% Lectura de datos de los sheets

# Serus seleccionables
for p in Productos:
    Sp[p-1]=int(sheetSerSelec.cell(p+1, 2).value)

# Makespan de cada producto
for p in Productos:
    DT[p-1]=int(sheetDT.cell(p+1, 2).value)

# Demanda
for p in Productos:
    Qp[p-1]=int(sheetDemanda.cell(p+1, 2).value)

# Límite superior de emisión de dióxido de carbono por tipo de producto
for p in Productos:
    Ep[p-1]=float(sheetCO2.cell(p+1, 2).value)

# Tiempo de procesado
for p in Productos:
    for s in Serus:
        tps[p,s]=float(sheetTiempo.cell(p+1, s+1).value)

# Energía consumida en seru s por unidad procesada de producto p
for p in Productos:
    for s in Serus:
        cps[p,s]=float(sheetEnergia.cell(p+1, s+1).value)

```



```

%% Creación variables

Makespan=m.addVar(lb=0.0, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="Makespan")

CO2=m.addVar(lb=0.0, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="CO2")

for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            Xps[p,s]=m.addVar(lb=0,ub=1,vtype=GRB.BINARY,name="Xps[%s,%s]"
%(p,s))

for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            Qps[p,s]=m.addVar(lb=0,vtype=GRB.INTEGER,name="Qps[%s,%s]"
%(p,s))

for p in Productos:
    Zp[p-1]=m.addVar(lb=0,vtype=GRB.CONTINUOUS,name="Zp[%s]" %p)

%% Restricciones

# Restricción (1): f1
m.addConstr(quicksum(Zp[p-1] for p in Productos)==Makespan, "Makespan")

# Restricción (2): f2
m.addConstr(quicksum(Qps[p,s]*cps[p,s]*Emission for p in Productos for s in
Serus if tps[p,s] >= 0)==CO2, "CO2")

# Restricción (3):
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            m.addConstr(Xps[p,s]<=Qps[p,s])
            m.addConstr(Qps[p,s]<=Zp[p-1]*Xps[p,s])

# Restricción (4):
for p in Productos:
    for s in Serus:

```

```

        if tps[p,s] >= 0:
            m.addConstr(Zp[p-1]>=tps[p,s]*Qps[p,s])

# Restricción (5):
for p in Productos:
    m.addConstr(quicksum(Qps[p,s] for s in Serus if tps[p,s] >= 0)==Qp[p-1],
"Demanda producto ",p)

# Restricción (6):
for p in Productos:
    m.addConstr(quicksum(Qps[p,s]*cps[p,s]*Emision for s in Serus if tps[p,s]
>= 0)<=Ep[p-1]*Qp[p-1], "Dioxido de carbono emitido por producto",p)

# Restricción (7):
m.addConstr(Makespan <= Deadline, "Makespan <= Deadline")

# Restricción (8):
# Impone que Xps es binaria, algo que está impuesto en la definición de la
variable

# Restricción (9):
# Impone que Qps es entera, algo que está impuesto en la definición de la
variable

#%% Optimización de funciones objetivo

# Minimizar f1
m.setObjective(Makespan, GRB.MINIMIZE)

# Minimizar f2
m.setObjective(CO2, GRB.MINIMIZE)

# Optimizamos el modelo
m.optimize()
m.write("Trab_seru.lp")

#%% Resultados:

# 1) Cantidad de producto que se hace en cada Seru
for p in Productos:
    print"\nProducto:",p
    for s in Serus:

```

```

        if tps[p,s] >= 0:
            if Xps[p,s].x+1>=1.001:
                print"\tSeru:",s
                print"\t\tCantidad:", Qps[p,s].x

# 2) Tiempo que permanece montado cada Seru
for p in Productos:
    Selec=0
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            if Xps[p,s].x+1>=1.001:
                Selec=1
    if Selec==1:
        print"\n Producto:",p
        print u"\t Tiempo máximo de procesado:",Zp[p-1].x

# 3) Dióxido de carbono emitido por la fabricación de producto p
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            CO2e[p-1]=CO2e[p-1]+Xps[p,s].x*Qps[p,s].x*cps[p,s]*Emission
    print"\nCO2 emitido por fab. producto %s: %s" %(p,CO2e[p-1])

# 4) Tiempos de comienzo de cada producto
Tp[0]=0
for p in range(1,N_Productos):
    Tp[p]=ceil(Tp[p-1]+Zp[p-1].x)

# 5) Representación gráfica en excel
workbookResult=xlwt.Workbook()
sheetResult = workbookResult.add_sheet("Resultados", cell_overwrite_ok=True)

sheetResult.write(s+1,0, "T max (Zp)")

for p in Productos:
    sheetResult.write(0, p, "Producto %s " %p)
    sheetResult.write(N_Serus+1,p,Zp[p-1].x)
    for s in Serus:
        sheetResult.write(s,0, "Seru %s" %s)
        if tps[p,s] >= 0:
            if Xps[p,s].x+1>=1.001:
                sheetResult.write(s,p,tps[p,s]*Qps[p,s].x)

```

```

        else:
            sheetResult.write(s,p,0)
    else:
        sheetResult.write(s,p,0)

for p in range(1,N_Productos):
    sheetResult.write(N_Serus+2,p+1,"Interm %s" %p)
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            sheetResult.write(s+N_Serus+2,p+1,Zp[p-1].x-tps[p,s]*Qps[p,s].x)
        else:
            sheetResult.write(s+N_Serus+2,p+1,Zp[p-1].x)

workbookResult.save("2_Resultados_prueba.xls")
#workbookResult.save("5_Resultados_caso_real.xls")

# 6) Makespan total
print"\nMakespan total: %d horas\n" %Makespan.x

# 7) Emision CO2 total
print u"\nEmisión de CO2: %d kgCO2e\n" %CO2.x

# 8) Valor de la función objetivo
print"\nFunción Objetivo = %.2f\n" %m.objVal

```

8.2 Código Python modelo ampliado

```

# -*- coding: utf-8 -*-
""" MODELO SOSTENIBILIDAD """

from gurobipy import quicksum
from gurobipy import GRB
from gurobipy import Model
from math import ceil
import xlrd
import xlwt

# Modelo del trabajo
m = Model("Seru Seisan")

# Datos caso prueba
#workbook=xlrd.open_workbook("1_Datos_prueba.xls")

```

```

# Datos caso real
workbook=xlrd.open_workbook("4_Datos_caso_real.xls")

# Carga de hojas de Excel de partida
sheetIni = workbook.sheet_by_name("Datos iniciales")
sheetSerSelec = workbook.sheet_by_name("Serus seleccionables")
sheetDemanda = workbook.sheet_by_name("Demanda")
sheetCO2 = workbook.sheet_by_name("Limite CO2")
sheetTiempo = workbook.sheet_by_name("Tiempo procesado")
sheetEnergia = workbook.sheet_by_name("Energia")
sheetCE = workbook.sheet_by_name("Costes de entrenamiento")
sheetDT = workbook.sheet_by_name("Makespan")

# Carga de datos de partida
N_Serus=int(sheetIni.cell(1, 2).value)
N_Productos=int(sheetIni.cell(2, 2).value)
Deadline=float(sheetIni.cell(3, 2).value)
Emission=float(sheetIni.cell(4, 2).value)
N_Trabajadores=int(sheetIni.cell(5,2).value)
CE=float(sheetIni.cell(6,2).value)
Coste_Inst=float(sheetIni.cell(7,2).value)

# Variables, formato lista y diccionario
Sp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Qp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Ep=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Tp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Zp=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
CO2e=[0 for p in range(1,N_Productos+1)]
DT=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
tps={}
cps={}
Xps={}
Qps={}
CTwps={}
CSps={}
Ywps={}

# Listas iterables para usar en los bucles
Productos=[p for p in range(1,N_Productos+1)]
Serus=[s for s in range(1,N_Serus+1)]

```

```

Trabajadores=[w for w in range(1,N_Trabajadores+1)]

#%% Lectura de datos de los sheets

# Serus seleccionables
for p in Productos:
    Sp[p-1]=int(sheetSerSelec.cell(p+1, 2).value)

# Makespan de cada producto
for p in Productos:
    DT[p-1]=int(sheetDT.cell(p+1, 2).value)

# Demanda
for p in Productos:
    Qp[p-1]=int(sheetDemanda.cell(p+1, 2).value)

# Límite superior de emisión de dióxido de carbono por tipo de producto
for p in Productos:
    Ep[p-1]=float(sheetCO2.cell(p+1, 2).value)

# Tiempo de procesado
for p in Productos:
    for s in Serus:
        tps[p,s]=float(sheetTiempo.cell(p+1, s+1).value)

# Energia consumida en seru s por unidad procesada de producto p
for p in Productos:
    for s in Serus:
        cps[p,s]=float(sheetEnergia.cell(p+1, s+1).value)

# Costes de entrenamiento
cont=0
for w in Trabajadores:
    for p in Productos:
        cont=(w-1)*N_Productos+p
        for s in Serus:
            CTwps[w,p,s]=float(sheetCE.cell(cont+1, s+2).value)

# Costes de set-up
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:

```

```

CSps[p,s]=float((Coste_Inst*Deadline)/(N_Productos*N_Serus*tps[p,s]))
### Variables

Makespan=m.addVar(lb=0.0, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="Makespan")

CO2=m.addVar(lb=0.0, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="CO2")

Coste=m.addVar(lb=0.0, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="Coste")

for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            Xps[p,s]=m.addVar(lb=0,ub=1,vtype=GRB.BINARY,name="Xps[%s,%s]"
%(p,s))

for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            Qps[p,s]=m.addVar(lb=0,vtype=GRB.INTEGER,name="Qps[%s,%s]"
%(p,s))

for p in Productos:
    Zp[p-1]=m.addVar(lb=0,vtype=GRB.CONTINUOUS,name="Zp[%s]" %p)

for w in Trabajadores:
    for p in Productos:
        for s in Serus:
            if CTwps[w,p,s] >= 0:

Ywps[w,p,s]=m.addVar(lb=0,vtype=GRB.BINARY,name="Ywps[%s,%s,%s]" %(w,p,s))

### Restricciones

# Restricción (1): f3
m.addConstr((quicksum(CSps[p,s]*Xps[p,s] for p in Productos for s in Serus if
tps[p,s] >= 0)+quicksum(cps[p,s]*Qps[p,s]*CE for p in Productos for s in
Serus if tps[p,s] >= 0)+quicksum(CTwps[w,p,s]*Ywps[w,p,s] for w in
Trabajadores for p in Productos for s in Serus if CTwps[w,p,s] >=
0)+quicksum(Coste_Inst*Zp[p-1] for p in Productos))==Coste,"Coste")

```

```

# Restricción (2):
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            m.addConstr(Zp[p-1]>=tps[p,s]*Qps[p,s])

# Restricción (3):
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            m.addConstr(Xps[p,s]<=Qps[p,s])
            m.addConstr(Qps[p,s]<=Qp[p-1]*Xps[p,s])

# Restricción (4):
for p in Productos:
    m.addConstr(quicksum(Qps[p,s] for s in Serus if tps[p,s] >= 0)==Qp[p-1],
"Demanda producto ",p)

# Restricción (5):
for p in Productos:
    m.addConstr(quicksum(Qps[p,s]*cps[p,s]*Emision for s in Serus if tps[p,s]
>= 0)<=Ep[p-1]*Qp[p-1], "Dioxido de carbono emitido por producto",p)

# Restricción (6):
m.addConstr(Makespan <= Deadline, "Makespan <= Deadline")

# Restricción (7):
# Impone que Xps es binaria, algo que está impuesto en la definición de la
variable

# Restricción (8):
# Impone que Qps es entera, algo que está impuesto en la definición de la
variable

# Restricción (9):
# Impone que Ywps es binaria, algo que está impuesto en la definición de la
variable

# Restricción (10):
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:

```



```

        m.addConstr(quicksum(Ywps[w,p,s] for w in Trabajadores if
CTwps[w,p,s] >= 0)==Xps[p,s])

# Restricción (11):
for w in Trabajadores:
    for p in Productos:
        m.addConstr(quicksum(Ywps[w,p,s] for s in Serus if CTwps[w,p,s] >=
0)<=1)

# Restricción (12):
for p in Productos:
    m.addConstr(Zp[p-1]<=DT[p-1])

# Definición del makespan
m.addConstr(quicksum(Zp[p-1] for p in Productos)==Makespan, "Makespan")

# Definición de las emisiones de CO2
m.addConstr(quicksum(Qps[p,s]*cps[p,s]*Emision for p in Productos for s in
Serus if tps[p,s] >= 0)==CO2, "CO2")

#%% Optimización de funciones objetivo

# Minimizar f1
#m.setObjective(Makespan, GRB.MINIMIZE)

# Minimizar f2
#m.setObjective(CO2, GRB.MINIMIZE)

# Minimizar f3
m.setObjective(Coste, GRB.MINIMIZE)

# Optimizamos el modelo
m.optimize()
m.write("Trab_seru.lp")

#%% Resultados:

# 1) Cantidad de producto que se hace en cada Seru
for p in Productos:
    print"\nProducto:",p
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:

```

```

        if Xps[p,s].x+1>=1.001:
            print"\tSeru:",s
            print"\t\tCantidad:", Qps[p,s].x

# 2) Tiempo que permanece montado cada Seru
for p in Productos:
    Selec=0
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            if Xps[p,s].x+1>=1.001:
                Selec=1
    if Selec==1:
        print"\n Producto:",p
        print u"\t Tiempo máximo de procesado:",Zp[p-1].x

# 3) Dióxido de carbono emitido por la fabricación de producto p
for p in Productos:
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            CO2e[p-1]=CO2e[p-1]+Xps[p,s].x*Qps[p,s].x*cps[p,s]*Emission
    print"\nCO2 emitido por fab. producto %s: %s" %(p,CO2e[p-1])

# 4) Tiempos de comienzo de cada producto
Tp[0]=0
for p in range(1,N_Productos):
    Tp[p]=ceil(Tp[p-1]+Zp[p-1].x)

# 5) Representación gráfica en excel
workbookResult=xlwt.Workbook()
sheetResult = workbookResult.add_sheet("Resultados", cell_overwrite_ok=True)

sheetResult.write(s+1,0, "T max (Zp)")

for p in Productos:
    sheetResult.write(0, p, "Producto %s " %p)
    sheetResult.write(N_Serus+1,p,Zp[p-1].x)
    for s in Serus:
        sheetResult.write(s,0, "Seru %s" %s)
        if tps[p,s] >= 0:
            if Xps[p,s].x+1>=1.001:
                sheetResult.write(s,p,tps[p,s]*Qps[p,s].x)
            else:

```

```

        sheetResult.write(s,p,0)
    else:
        sheetResult.write(s,p,0)

for p in range(1,N_Productos):
    sheetResult.write(N_Serus+2,p+1,"Interm %s" %p)
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >= 0:
            sheetResult.write(s+N_Serus+2,p+1,Zp[p-1].x-tps[p,s]*Qps[p,s].x)
        else:
            sheetResult.write(s+N_Serus+2,p+1,Zp[p-1].x)

#workbookResult.save("2_Resultados_prueba.xls")
workbookResult.save("5_Resultados_caso_real.xls")

# 6) Distribución trabajadores
for w in Trabajadores:
    print"\n Trabajador:",w
    for p in Productos:
        for s in Serus:
            if CTwps[w,p,s] >= 0:
                if Ywps[w,p,s].x+1>=1.001:
                    print"\n\t Producto:",p
                    print"\n\t\t Seru:",s

# 7) Coste total
print "\nCoste total: %d euros\n" %Coste.x

# 8) Makespan total
print"\nMakespan total: %d horas\n" %Makespan.x

# 9) Emision CO2 total
print u"\nEmisión de CO2: %d kgCO2e\n" %CO2.x

# 10) Valor de la función objetivo
print"\nFunción Objetivo = %.2f\n" %m.objVal

#%% Visualización costes desagregados

Coste_total_inst = 0
Coste_total_set_up = 0
Coste_total_consumo_energ = 0

```

```

Coste_total_entren = 0
for p in Productos:
    # Coste de instalación
    Coste_total_inst = Coste_total_inst + Coste_Inst*Zp[p-1].x
    for s in Serus:
        if tps[p,s] >=0:
            # Coste de Set-up
            Coste_total_set_up=Coste_total_set_up+CSps[p,s]*Xps[p,s].x
            # Coste de consumo energético

Coste_total_consumo_energ=Coste_total_consumo_energ+cps[p,s]*Qps[p,s].x*CE
    for w in Trabajadores:
        if CTwps[w,p,s] >= 0:
            # Coste de entrenamiento
            Coste_total_entren = Coste_total_entren +
CTwps[w,p,s]*Ywps[w,p,s].x

print "Coste total de entrenamiento: \t",Coste_total_entren
print u"Coste total de consumo energético: \t",Coste_total_consumo_energ
print "Coste total de instalación: \t",Coste_total_inst
print "Coste total de set-up: \t",Coste_total_set_up

asig=0
for w in Trabajadores:
    for p in Productos:
        for s in Serus:
            if (w,p,s) in Ywps:
                asig=asig+Ywps[w,p,s].x

```

9 REFERENCIAS

- [1] Luis de Lara Prats; “*Estudio, diseño y aplicación de la reconfiguración de una línea de montaje al sistema de producción Seru Seisan*”; 2017.
- [2] ChenGuang Liu, Na Yang, WenJuan Li, Jie Lian, Steve Evans & Yong Yin; “*Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems*”; 2013.
- [3] ChenGuang Liu, Fen Dang, WenJuan Li, Jie Lian, Steve Evans & Yong Yin; “*Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures*”; 2015.
- [4] ChenGuang Liu, Jie Lian, Yong Yin & WenJuan Li; “*Seru Seisan - An innovation of the production management mode in Japan*”; 2010.
- [5] Ikou Kaku; “*A Fundamental Positive Investigation into Japanese Seru Production Systems*”; 2016.
- [6] Yang Yu, Wei Sun, Jiafu Tang, Ikou Kaku & Junwei Wang; “*Line-seru conversion towards reducing worker(s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions*”; 2017.
- [7] Yang Yu, Wei Sun, Jiafu Tang & Junwei Wang; “*Line-hybrid seru system conversion - Models, complexities, properties, solutions and insights*”; 2017.
- [8] V. K. Manupati, T. Vemkata Deepthi, K. Ramakotiah & S. S. Rao; “*Reconfiguration of Networked Seru Production systems in an Indian Perspective*”; 2015.
- [9] XiaoLi Zhang, ChenGuang Liu, Wen Juan Li, Steve Evans & Yong Yin; “*Effects of key enabling technologies for seru production on sustainable performance*”; 2017.
- [10] Yong Yin, Kathryn E. Stecke, Morgan Swink & Ikou Kaku; “*Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment*”; 2017.
- [11] L. Luo, Z. Zhang & Y. Yin; “*Seru Loading with Worker-Operation Assignment in Single Period*”; 2016.
- [12] Jian Wang, Huixia Liu, Peng Qu & Yong Yin; “*Design and Operations of Seru Manufacturing- Case Study*”; 2013.

- [13] ChenGuang Liu, Kathryn E. Steckeb, Jie Liana & Yong Yin; “*An implementation framework for seru production*”; 2014.
- [14] Yang Yu, Jun Gong, Jiafu Tang, Yong Yin & Ikou Kaku; “*How to carry out assembly line cell conversion - A discussion based on factor analysis of system performance improvements*”; 2012.
- [15] Yang Yu, Jiafu Tang, Wei Sun, Yong Yin & Ikou Kaku; “*Combining local search into non-dominated sorting for multi objective line cell conversion problem*”; 2013.
- [16] Yang Yu, Jiafu Tang, Jun Gong, Yong Yin & Ikou Kaku; “*Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem*”; 2014.
- [17] Yang Yu, Sihan Wang, Jiafu Tang, Ikou Kaku & Wei Sun; “*Complexity of line-seru conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi-objective optimization*”; 2016.
- [18] Agostino Villa & Teresa Taurino; “*From JIT to Seru, for a production as lean as possible*”; 2013.
- [19] Wei Sun, Qianqian Li, Chunhui Huo, Yang Yu, & KeMa; “*Formulations, Features of Solution Space, and Algorithms for Line-Pure Seru System Conversion*”; 2016.
- [20] ChenGuang Liu, WenJuan Li, Jie Liana & Yong Yin; “*Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus*”; 2012.
- [21] Chaitanya Gangal, Chaitanya Bhushan & Shilpa Agrawal, Akshay; “*Analyzing the effect of line-cell conversion on manufacturing systems*”.
- [22] Kuo-Ching Ying & Yi-Ju Tsai; “*Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems*”; 2017.
- [23] YangYu, JiafuTang, WeiSun, Yong Yin & Ikou Kaku; “*Reducing worker(s) by converting assembly line into a pure cell system*”; 2013.
- [24] Yu Sakazume; “*Conditions for successful implementation of assembly cells*”; 2006.
- [25] Miyake; “*The shift from belt conveyor line to work-cell based assembly systems to cope with increasing demand variation and fluctuation in the Japanese electronics industries*”; 2006.
- [26] Yong Yin, Ikou Kaku & Kathryn E. Stecke; “*The evolution of seru production systems throughout Canon*”; 2008.

- [27] Kathryn E. Stecke, Yong Yin, Ikou Kaku & Yasuhiko Murase; “*Seru: the organizational extension of JIT for a super-talent factory*”; 2012.
- [28] Katsuhide Isa & Tsuyoshi Tsuru; “*Cell production and workplace innovation in Japan: toward a new model for Japanese manufacturing*”; 2002.
- [29] Dan Jonsson, Lars Medbo & Tomas Engström; “*Some considerations relating to the reintroduction of assembly lines in the Swedish automotive industry*”; 2004.
- [30] Yu Sakazume; “*Is Japanese cell manufacturing a new system? A comparative study between Japanese cell manufacturing and cellular manufacturing*”; 2005.
- [31] Ikou Kaku, Yasuhiko Murase & Yong Yin; “*A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing*”; 2008.
- [32] Ikou Kaku, Jun Gong, Jiafu Tang & Yong Yin; “*A mathematical model for converting conveyor assembly line to cellular manufacturing*”; 2008.
- [33] Ikou Kaku, Jun Gong, Jiafu Tang & Yong Yin; “*Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems*”; 2009.
- [34] Danny J Johnson; “*Converting assembly lines to assembly cells at sheet metal products: insights on performance improvements*”; 2005.