



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

OPTIMIZACIÓN DE LA SECUENCIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA EMPRESA DEL SECTOR DE LOS AEROSOLES

AUTOR: ALBERTO MARTÍNEZ SÍO
TUTOR: VICENT GINER BOSCH
COTUTOR: FEDERICO PEREA ROJAS-MARCOS

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo de mis tutores Vicent y Federico, por estar siempre disponibles para ayudarme en el desarrollo de este trabajo. También agradecer a mi familia el apoyo durante este tiempo, facilitándome toda la ayuda necesaria para que pudiera compaginar el trabajo con los estudios y a mi novia Cecilia por su apoyo y paciencia. Así mismo, no puedo olvidar en este momento a mis compañeros con los que tan buenos momentos he vivido en esta experiencia en la UPV.

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda la optimización de la secuenciación de la producción en una empresa del sector de los aerosoles; concretamente, de su línea de productos para el hogar. Se trata de una situación real detectado durante la realización de unas prácticas de empresa y no de un caso de estudio. La empresa necesita planificar la secuenciación de las órdenes de producción que se reciben diariamente, de modo que se reduzcan los tiempos de transición. El trabajo comprende tanto la modelización matemática del problema como la elaboración de una solución informática que permita obtener una secuencia de producción óptima. Así mismo, se evalúa la eficiencia y el ahorro de coste de esta metodología comparando los resultados que esta ofrece frente a datos reales de producción. Por último, se evalúa la capacidad de la solución informática desarrollada para abordar problemas de mayor tamaño, desde el punto de vista de la cantidad de trabajos a secuenciar.

Como resultado de este proyecto se ha conseguido desarrollar satisfactoriamente la herramienta informática para secuenciar la producción. Los resultados de la simulación de la utilización de la herramienta muestran una mejora de la disponibilidad del 2% (lo que supone 350 horas anuales) de las líneas de producción, así como un beneficio económico de 585.054€. Del análisis de capacidad de la herramienta se concluye que la herramienta es apta para secuenciar hasta 54 trabajos en dos máquinas, siendo por lo tanto apta para problemas de mayor envergadura que el planteado.

Palabras Clave: Secuenciación de la producción, Optimización, Aerosoles.

RESUM

En el present treball s'aborda l'optimització de la seqüenciació de la producció en una empresa del sector dels aerosols; concretament, de la seua línia de productes per a la llar. Es tracta d'una situació real i no d'un cas d'estudi. L'empresa necessita planificar la seqüenciació de les ordres de producció que es reben diàriament, de manera que es reduïsquen els temps de transició. El treball comprén tant la modelització matemàtica del problema com l'elaboració d'una solució informàtica que permeta obtindre una seqüència de producció òptima. Així mateix, s'avalua l'eficiència i l'estalvi de cost d'esta metodologia comparant els resultats que aquesta oferix enfront de dades reals de producció. Finalment, s'avalua la capacitat de la solució informàtica desenvolupada per a abordar problemes més grans, des del punt de vista de la quantitat de treballs a seqüenciar.

Com a resultat d'aquest projecte s'ha aconseguit desenvolupar satisfactòriament la solució informàtica per a seqüenciar la producció. Els resultats de la simulació de la utilització de la solució mostren una millora de la disponibilitat del 2% (la qual cosa suposa 350 hores anuals) de les línies de producció, així com un benefici econòmic de 585.054 €. De l'anàlisi de capacitat de la solució informàtica es conclou que és apta per a seqüenciar fins a 54 treballs en dues màquines, i per tant és apta per a problemes de més envergadura que el plantejat.

Paraules clau: Planificació de la producció, Optimització, Aerosols.

ABSTRACT

In this Project, production sequencing optimization in an aerosol sector company is approached, specifically in its home care products line. It is actually a real case found during my internship at a company, not a study case. The company needs to plan the sequence of the production orders daily received, in a way that transition times are reduced. The project involves mathematical modelling as well as the development of a software solution that enables to obtain an optimal production sequence. Moreover, the efficiency and cost saving of this methodology is evaluated comparing the results it offers with the real production data. Finally, the capacity of the software solution developed is evaluated for bigger size problems, from a number of jobs to sequence point of view.

As a result of this project, a digital tool to sequence the production has been successfully developed. Results of the simulation of the use of this tool show an improvement of the availability of the lines of 2% (meaning 350 hours a year), as well as an economic Benefit of 585.054€. From the performance análisis of the tool we come to the conclusión that the tool can handle up to 54 jobs in two machines, making it suitable for greater problems tan the one described in this proyect.

Keywords: Job scheduling, Optimisation, Aerosols.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Presupuesto
- Anexos

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y motivación.....	1
1.1. Objetivo.....	1
1.3. Estructura del documento.....	2

CAPÍTULO 2: CONTEXTO DEL PROYECTO

2.1. Empresa.....	3
2.2. Subcontrata de producción.....	6
2.3. Equipamiento de la planta de producción	7
2.4. Proceso de producción.....	9
2.4.1. Premezclado.....	10
2.4.2. Fórmula principal	11
2.4.3. Embotellado	12
2.4.4. Transición entre fórmulas	12
2.4.5. Limpieza y desinfección.....	14
2.5. Proceso de planificación de las órdenes de producción	15
2.6. Datos disponibles	16
2.6.1. Matriz de transiciones.....	16
2.6.2. Datos de producción	17
2.6.3. Datos de disponibilidad y rendimiento	18
2.6.4. Residuos	18

2.7. Revisión literaria..... 19

CAPÍTULO 3: MODELO MATEMÁTICO

3.1. Introducción al modelo matemático..... 21

3.2. Datos del problema 22

3.3. Variables..... 22

3.4. Función objetivo..... 23

3.5. Restricciones 23

 3.5.1. Restricción 1 23

 3.5.2. Restricción 2 23

 3.5.3. Restricción 3 24

 3.5.4. Restricción 4 24

 3.5.5. Restricción 5 24

 3.5.6. Restricción 6 24

 3.5.7. Restricción 7 25

 3.5.8. Restricción 8 25

 3.5.9. Restricción 9 25

3.6. Modelo monomáquina..... 26

 3.6.1. Datos del modelo monomáquina..... 26

 3.6.2. Variables del modelo monomáquina 27

 3.6.3. Función Objetivo modelo monomáquina 27

 3.6.4. Restricción 1 modelo monomáquina 27

 3.6.5. Restricción 2 modelo monomáquina 28

 3.6.6. Restricción 3 modelo monomáquina 28

 3.6.7. Restricción 4 modelo monomáquina 28

 3.6.8. Restricción 5 modelo monomáquina 28

CAPÍTULO 4: PROGRAMA INFORMÁTICO

4.1. Introducción 29

4.2. Herramientas utilizadas 29

 4.2.1. Python 29

 4.2.2. Pyomo 29

 4.2.3. Spyder..... 29

4.2.4. Gurobi.....	29
4.2.5. GLPK	30
4.2.6. Microsoft Excel.....	30
4.3. Estructura del programa	30
4.3.1. Importación de módulos	30
4.3.2. Importación de datos.....	31
4.3.3. Definición del modelo y rangos de los datos	31
4.3.4. Definición de variables y parámetros.....	32
4.3.5. Definición de la función objetivo, restricciones y resolución del modelo	33
4.3.6. Separación de resultados por líneas	33
4.3.7. Obtención de las matrices reducidas para cada máquina	34
4.3.8. Definición del modelo y rangos de las variables monomáquina	35
4.3.9. Definición de variables y parámetros monomáquina.....	35
4.3.10. Definición de la función objetivo, restricciones y resolución del modelo monomáquina	35
4.3.11. Obtención y visualización de resultados.....	36

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. Introducción	37
5.2. Parámetros para los cálculos	38
5.3. Método de simulación	39
5.4. Resultados de la simulación	43
5.5. Análisis económico.....	46
5.5.1. Ahorro derivado de la reducción del número de transiciones rojas.....	46
5.5.2. Beneficio derivado del aumento de la capacidad de producción.....	47
5.5.3. Beneficio total	48
5.6. Análisis de capacidad de la herramienta informática	49
5.6.1. Análisis utilizando Gurobi.....	50
5.6.2. Análisis utilizando GLPK	52

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones.....	54
6.2. Líneas futuras	55

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Estudio Previo.....	61
2. Desarrollo de modelo matemático y algoritmos	61
3. Análisis y resultados	62
4. Total.....	62

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE TRANSICIONES	64
ANEXO 2: CÓDIGO DEL PROGRAMA	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ventas por segmento de negocio. Fuente: elaboración propia a partir de documentación de la empresa.....	4
Ilustración 2: División por mercados de la compañía. Fuente: elaboración propia a partir de documentación de la empresa.....	4
Ilustración 3: Lata de aerosol. Fuente: shutterstock.com.....	6
Ilustración 4: Esquema de las líneas de producción de la planta.....	9
Ilustración 5: Matriz de transiciones. Fuente: documentación interna de la empresa.	13
Ilustración 6: Aspecto del archivo Excel con la matriz de transiciones. Fuente: documentación interna de la empresa.	16
Ilustración 7: Aspecto de las casillas de la matriz	17
Ilustración 8: Importación de módulos	31
Ilustración 9: Ejemplo de modelo concreto	31
Ilustración 10: Ejemplo de modelo abstracto	32
Ilustración 11: Definición del modelo y rangos.....	32
Ilustración 12: Declaración de variables	33
Ilustración 13: Ejemplo de declaración de restricción en Pyomo	33

Ilustración 14: Obtención de listas de fórmulas a procesar en cada línea	34
Ilustración 15: Definición del modelo y rangos para la línea 1	35
Ilustración 16: Representación en Pyomo restricción 5 del modelo monomáquina.....	36
Ilustración 17: Ejemplo de visualización de resultados.....	36
Ilustración 18: Aspecto de la matriz de transiciones reducida en formato txt.....	41
Ilustración 19: Aspecto de la matriz de tiempos de procesado en formato txt.....	41
Ilustración 20: Código para medir el tiempo de procesado de la herramienta informática	50
Ilustración 21: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con Gurobi.....	52
Ilustración 22: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con GLPK	53
Ilustración 23: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con GLPK	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ficha técnica tanques principales.....	8
Tabla 2: Ficha técnica tanques de premezclado	8
Tabla 3: Ficha técnica sistema de Pigs	9
Tabla 4: Proceso de producción del premezclado de perfume para un volumen de 550l	10
Tabla 5: Proceso de producción de la fórmula principal para un volumen de 6T	11
Tabla 6: Tiempos de producción de fórmula en función de tamaño de lote.....	12
Tabla 7: Estimación de tiempos de embotellado en función del tamaño de lote	12
Tabla 8: Pasos del procedimiento de limpieza	14
Tabla 9: Pasos del procedimiento de desinfección	15
Tabla 10: Proceso de planificación y confirmación de las órdenes de producción	15
Tabla 11: Ejemplo de datos de producción compartidos por la subcontrata	17
Tabla 12: Resumen de datos de disponibilidad.....	18
Tabla 13: Datos de cantidades y coste de transición roja.....	19
Tabla 14: Resumen de parámetros utilizados en los cálculos del análisis de resultados	39
Tabla 15: Introducción de fórmulas a secuenciar en el archivo Excel	40
Tabla 16: Secuencia obtenida tras la ejecución del programa.....	42
Tabla 17: Resumen de la simulación	42
Tabla 18: Resumen de resultados de simulación para octubre y noviembre	43

Tabla 19: Mejoras obtenidas en la simulación de octubre a noviembre	44
Tabla 20: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas octubre-noviembre	44
Tabla 21: Resumen de resultados de simulación anuales.....	45
Tabla 22: Mejoras obtenidas en la simulación anual	45
Tabla 23: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas anual	46
Tabla 24: Ahorro económico de la reducción del número de transiciones rojas para el período octubre-noviembre	47
Tabla 25: Ahorro económico de la reducción del número de transiciones rojas anual.....	47
Tabla 26: Beneficio derivado del aumento de capacidad para el período octubre-noviembre .	48
Tabla 27: Beneficio derivado del aumento de la capacidad anual.....	48
Tabla 28: Beneficio total para el período octubre-noviembre.....	49
Tabla 29: Beneficio total anual.....	49
Tabla 30: Simulación de capacidad para 2 máquinas en función del número de trabajos con Gurobi.....	51

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Función objetivo	23
Ecuación 2: Función objetivo modelo monomáquina.....	27

ÍNDICE DE RESTRICCIONES

Restricción 1.....	23
Restricción 2.....	23
Restricción 3.....	24
Restricción 4.....	24
Restricción 5.....	24
Restricción 6.....	25
Restricción 7.....	25
Restricción 8.....	25
Restricción 9.....	26
Restricción 10: Restricción 1 modelo monomáquina	27
Restricción 11: Restricción 2 modelo monomáquina	28
Restricción 12: Restricción 3 modelo monomáquina	28

Restricción 13: Restricción 4 modelo monomáquina 28

Restricción 14: Restricción 5 modelo monomáquina 28

DOCUMENTO 1: MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La motivación de este trabajo viene dada por el problema real surgido durante el período en el que me encontraba realizando unas en una empresa que, por motivos de confidencialidad, no será mencionada. Esta empresa pertenece al sector de bienes de consumo y comercializa, entre otros productos, aerosoles. La gama ofrecida por esta empresa se compone de hasta 42 aerosoles diferentes, que se comercializan en distintos países de Europa. Éstos se constituyen de una base común y se diferencian principalmente por el perfume. La empresa subcontrata la fabricación de estos aerosoles a una planta de producción de una compañía externa.

Durante la producción, cuando se realiza un cambio de fórmula de aerosol, es necesario realizar una transición para el cambio de producción de una fórmula a otra. Existen dos tipos de transición, dependiendo de la fórmula previa y la que se produce a continuación:

- **Transición Verde:** si el perfume del producto anterior es igual o menos fuerte que el que va a ser producido a continuación, se bombea el nuevo producto a la línea de empaquetado, empujando los restos del anterior, que se desechan.
- **Transición Roja:** si el perfume del producto anterior es más fuerte que el entrante, se bombea una solución de limpieza para limpiar de aroma la línea de transferencia y la línea de empaquetado.

El criterio para definir si un perfume es más fuerte que otro se determina mediante pruebas empíricas realizadas por el equipo de I+D.

La Transición Roja es más larga (**2 horas frente a 20 minutos**) y considerablemente más costosa, ya que se debe limpiar la línea de producción previamente al inicio de la siguiente producción.

En cuanto al proceso productivo, la empresa lanza las órdenes de producción de forma diaria, y éstas, una vez aceptadas, deben de ser producidas en un plazo de 24 horas. La subcontrata debe encargarse de secuenciar las fórmulas de aerosol contenidas en la orden y ejecutar la producción.

Al analizar los datos de producción aportados por la subcontrata, se encuentra una baja eficiencia de las líneas de producción utilizadas para estos aerosoles. Una de las causas es el gran número de transiciones rojas, que causan paradas de máquina y, por lo tanto, pérdidas de disponibilidad.

1.2. OBJETIVO

Ante la dificultad de la subcontrata para secuenciar de forma óptima la producción, se genera la necesidad de **generar un método de secuenciación con el fin de reducir el número de transiciones rojas** y por lo tanto mejorar la eficiencia de las líneas y reducir costes de fabricación.

Adicionalmente, está previsto un aumento gradual de la producción debido al incremento de la demanda de este tipo de producto derivada de la crisis sanitaria iniciada en 2020. Esto hace que sea necesario reducir al máximo los tiempos de parada con objeto de aumentar la capacidad de las líneas.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se ha estructurado en cinco bloques principales. En el primero se contextualiza el marco en el que se desarrolla el proyecto, explicando el caso y exponiendo los datos de los que se dispone y las restricciones del problema.

En un segundo bloque se describe el modelo matemático que se ha escogido para representar el problema real que se busca resolver.

El tercer bloque trata detalladamente sobre la herramienta informática desarrollada para resolver el modelo matemático antes expuesto y obtener así una solución óptima al problema de secuenciación de la producción planteado.

En el cuarto bloque se exponen los resultados de la simulación realizada a partir de los datos de producción reales con el objetivo de evaluar el impacto económico de la utilización de la herramienta desarrollada. También se hace una simulación de capacidad de la herramienta informática para conocer la capacidad máxima de tamaño de problema de secuenciación que puede resolver y estimar su posible implementación en casos similares de mayor envergadura.

Por último, se exponen las conclusiones de este proyecto y las líneas futuras a trabajar.

CAPÍTULO 2: CONTEXTO DEL PROYECTO

2.1. EMPRESA

Como se ha mencionado anteriormente, el problema se desarrolla dentro de una empresa del sector de bienes de consumo, en su división europea.

Esta empresa es una multinacional estadounidense que opera en 70 países. Su mercado se concentra en marcas líderes en sus respectivos sectores. Cuenta con 65 marcas diferentes comercializadas en 180 países que buscan ser de una calidad y valor superior y que, por ello, obtengan el liderazgo en el mercado a través de la satisfacción de sus consumidores.

Así mismo, tiene una plantilla de alrededor de 100.000 empleados distribuidos por todo el mundo, con aproximadamente 5.000 millones de consumidores.

Durante la última década la compañía ha sufrido una reestructuración en la que se ha quedado con las principales marcas, que generan el 80% de los ingresos, y ha vendido o eliminado el resto. Así mismo, ha subdividido las operaciones de la empresa en 4 unidades de negocio o segmentos con el fin de agrupar las marcas y simplificar el negocio. Dichos segmentos son los siguientes:

- Cuidado de Belleza, Pelo y Cuidado Personal.
- Cuidado Femenino, de Familia y Bebés.
- Salud y bello corporal
- Cuidado del Hogar y Tejidos

Este trabajo se engloba en el segmento Cuidado del Hogar y Tejidos. Este segmento representa el 32% de las ventas netas totales de la compañía (véase Ilustración 1). El crecimiento de este segmento durante el último año es del 30%, debido principalmente al aumento de la venta de productos de limpieza derivada del Covid-19.

En cuanto a la división por mercados de la compañía, existe una división en 5 regiones a nivel mundial (véase Ilustración 2):

- Norteamérica
- América Latina
- Europa
- Asia y Oceanía
- IMEA: India, África y Oriente Medio.

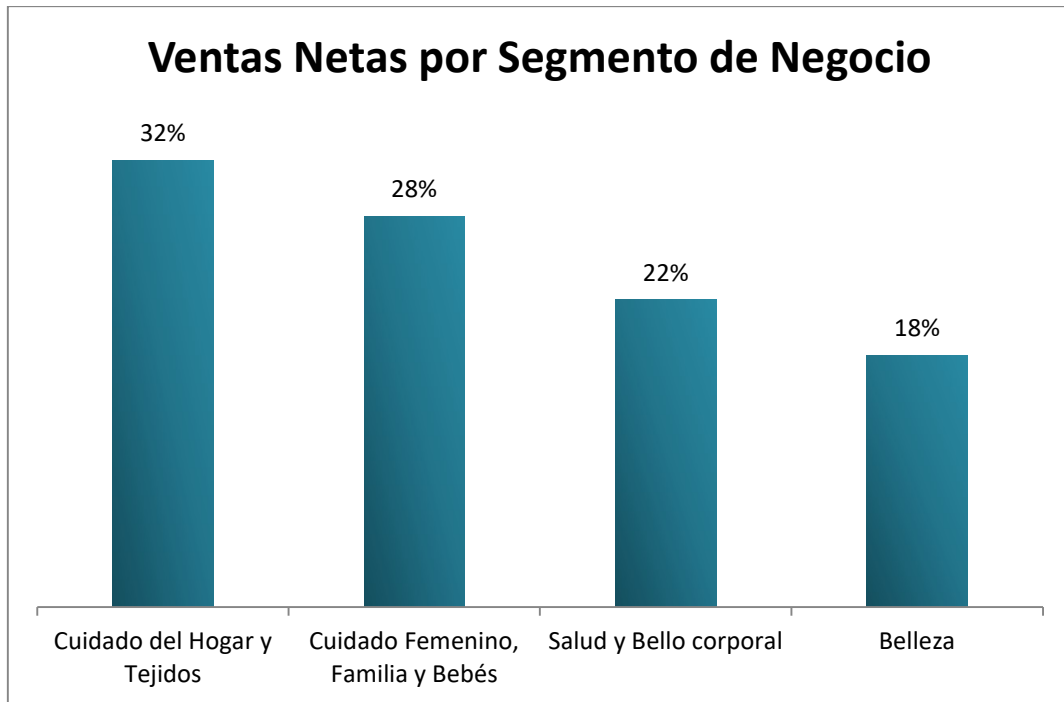


Ilustración 1: Ventas por segmento de negocio. Fuente: elaboración propia a partir de documentación de la empresa.

En este contexto, Europa supone el 23% del volumen neto de ventas de la compañía. En esta región, en la que está presente desde 1930, tiene 730 millones de consumidores, lo que representa 15.000 millones de dólares en ventas netas y un "market size" de 181.000 millones de dólares. Así mismo, un tercio de los empleados de la compañía están localizados en Europa.

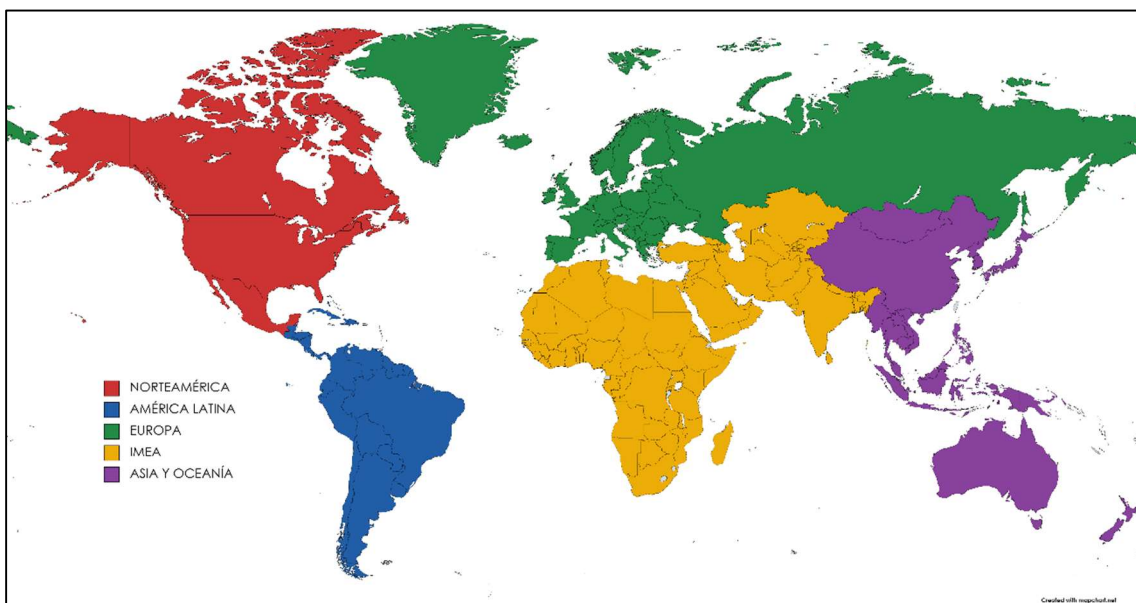


Ilustración 2: División por mercados de la compañía. Fuente: elaboración propia a partir de documentación de la empresa.

Internamente, cada unidad de negocio está dividida en 8 funciones:

- Marca: gestión de la marca, comunicaciones, etc.
- Ventas
- Finanzas y Contabilidad
- Recursos Humanos
- Departamento Legal
- Suministro de Producto
- Tecnología de la información
- I+D

Gran parte de los productos de Cuidado del Hogar y Tejidos son producidos en factorías propias de la compañía, pero existe una parte de la producción que se subcontrata a empresas externas. Existen básicamente tres motivos por los que se subcontrata la producción:

- **Absorber la fluctuación de la demanda:** cuando existen picos de demanda y las fábricas propias no la pueden absorber, se subcontrata parte de esta producción, pues se evita así hacer una inversión extra en equipamiento y personal para una producción temporal.
- **Introducción de un nuevo producto:** cuando se quiere introducir un nuevo producto en el mercado y evaluar la aceptación del público, se recurre a la subcontrata para evitar así realizar una primera inversión en equipamiento sin la certeza de la continuidad de ese producto.
- **Fabricación peligrosa:** algunos productos, como los aerosoles, tienen un proceso de producción de riesgo. Para evitar accidentes que repercutan en la imagen de la empresa se recurre a la subcontratación de esta producción.

Con este fin, dentro de la empresa, existe un departamento que se encarga de gestionar la parte de la producción que es subcontratada, llamado "Soluciones de Suministro Externas (SSE)". Este departamento cuenta con 9 secciones:

- Cadena de suministro
- Dirección de operaciones
- Dirección de proyectos
- Operaciones de procesos
- Operaciones de empaquetado
- Calidad
- Administración
- Compras
- Planificación

Este departamento gestiona 32 subcontratas en Europa, 2 en China y 1 en la República Dominicana. Para Cuidado del hogar, su operación representa el 20% del total de la compañía en Europa.

En lo que se refiere al control de la parte operacional de la subcontrata, existen dos secciones:

- La primera, dedicada a la parte de procesos, llamada Operaciones de Procesos o "Making". Ésta se encarga desde las materias primas hasta que la fórmula

manufacturada a partir de las materias primas es introducida en el recipiente. Este trabajo de fin de máster se desarrolla sobre la parte de "Making".

- La segunda, llamada Operaciones de Empaquetado o "Packing", es responsable desde que el recipiente es llenado hasta que el producto llega al centro de distribución para ser comercializado.

Entre los distintos productos que se trabajan en el departamento de SSE, se encuentran los **Aerosoles**. La producción de este departamento mediante subcontratas supone el 100% del volumen total de Aerosoles dedicados al Cuidado del Hogar para Europa de esta empresa. De la producción de estos Aerosoles se encarga una sola subcontrata. Estos aerosoles son después comercializados en Italia, Francia, Alemania, Austria, Suiza y el Reino Unido.



Ilustración 3: Lata de aerosol. Fuente: shutterstock.com.

2.2. SUBCONTRATA DE PRODUCCIÓN

La subcontrata que se encarga de la producción de Aerosoles tiene como cometido desde la compra de las materias primas hasta el envío del producto final al centro de distribución. Para ello, debe seguir las pautas dadas por el departamento de SSE.

Esta subcontrata se trata de una empresa con sede en Italia. Fundada en 1947, está presente en 6 países con 1700 empleados. Las categorías de productos que fabrica son, entre otros, belleza y cuidado personal, cuidado del hogar y dispositivos médicos y quirúrgicos. Entre sus principales fortalezas destacan la flexibilidad y su capacidad técnica.

Dentro del acuerdo con la subcontrata se encuentran los siguientes términos:

- Es la empresa la que decide las materias primas y la cadena de suministro.
- La subcontrata debe respetar las instrucciones de fabricación y la formulación de los productos.
- No se puede cambiar el equipo utilizado para la producción sin el permiso de la empresa.
- La subcontrata debe respetar el plan de muestreo y los análisis de calidad.

Dado que la producción de aerosoles se considera de riesgo, la compañía decidió, como estrategia, subcontratar la producción de éstos a empresas especializadas, con el objeto de reducir costes y evitar posibles riesgos o accidentes en la planta que repercutieran negativamente en la imagen de la empresa.

Así mismo, la relativa simplicidad del proceso permite que la empresa subcontratada no requiera de un alto grado de sofisticación en su equipamiento y sistemas.

Aunque la empresa define el proceso, equipamiento y materiales a utilizar, no interviene en la producción diaria de la subcontrata, que se encarga independientemente de organizar la producción y las actividades que conciernen a la misma.

2.3. EQUIPAMIENTO DE LA PLANTA

A continuación, se detalla el equipamiento disponible en la planta de la subcontrata que se utiliza para la producción de Aerosoles. Existen dos líneas gemelas de producción. Ambas líneas se componen de los siguientes elementos:

- **Tanque principal:** tanque principal donde se produce la fórmula del Aerosol que después será embotellada. Se conecta a través de una bomba al distribuidor, que se conecta a continuación a la línea de empaquetado.
- **Tanque de premezclado:** tanque en el que se produce previamente la solución de perfume que, una vez acabada, se añade en el tanque principal a la fórmula final.
- **Bomba de ingredientes:** mediante esta bomba se introducen los ingredientes (productos químicos que conforman la fórmula) tanto en el tanque principal como en el tanque de perfume.
- **Bomba de recirculación:** se utiliza para la recirculación en el tanque principal o entre el tanque principal y el tanque de perfume.
- **Pigs:** sistema que se sitúa entre el distribuidor y la línea de empaquetado. Se utiliza para las transiciones y evita que haya que desechar la fórmula restante que queda en las tuberías del sistema de distribución una vez se ha vaciado el tanque.

En la Tabla 1 se detallan las características técnicas de los tanques principales, en la Tabla 2 las características de los tanques de premezclado y en la Tabla 3 el sistema de PIGS.

Tanques principales R06 y R07

Tamaño	24T
Capacidad	de 1T a 20T
Agitación	2 rotores: 4 palas cada rotor, orientadas a 90 grados velocidad de giro: 0 a 40rpm
Dimensiones	Altura: 4750mm Diámetro: 2800mm Material: acero Inoxidable AINSI 304
Calentamiento/ Enfriamiento	Sin sistemas de calentamiento o enfriamiento La sala de producción está controlada térmicamente
Comentarios	Ambos tanques están montados sobre células de pesaje

Tabla 1: Ficha técnica tanques principales

Tanques de premezclado R04 y R05

Tamaño	700l
Capacidad	e 20l a 550l
Agitación	2 rotores Velocidad: de 0 a 64rpm
Dimensiones	Altura: 4750mm Diámetro: 2800mm Material: Acero Inoxidable AINSI 304
Calentamiento/ Enfriamiento	Sin sistemas de calentamiento o enfriamiento La sala de producción está controlada térmicamente
Comentarios	Las materias primas se introducen mediante una bomba. El premezclado de perfume se añade al tanque principal mediante la misma bomba.

Tabla 2: Ficha técnica tanques de premezclado

El sistema de Pigs consta de dos pistones accionados por aire a presión o por el propio contenido de la tubería que empujan el fluido o el aire que llena las tuberías hasta la zona de llenado. Tienen una estación de salida y una estación de llegada. La razón de que sean 2 pistones es para evitar que aparezcan burbujas de aire en la tubería.

Sistema de Pigs	
Tipo	Doble estación (salida y llegada)
Características	Un sensor de cierre y 2 sensores de posición del Pig
Fuente de aire	Unidad de aire automática (20-500l/min)

Tabla 3: Ficha técnica sistema de Pigs

El esquema de la planta con las dos líneas se muestra en la Ilustración 4.

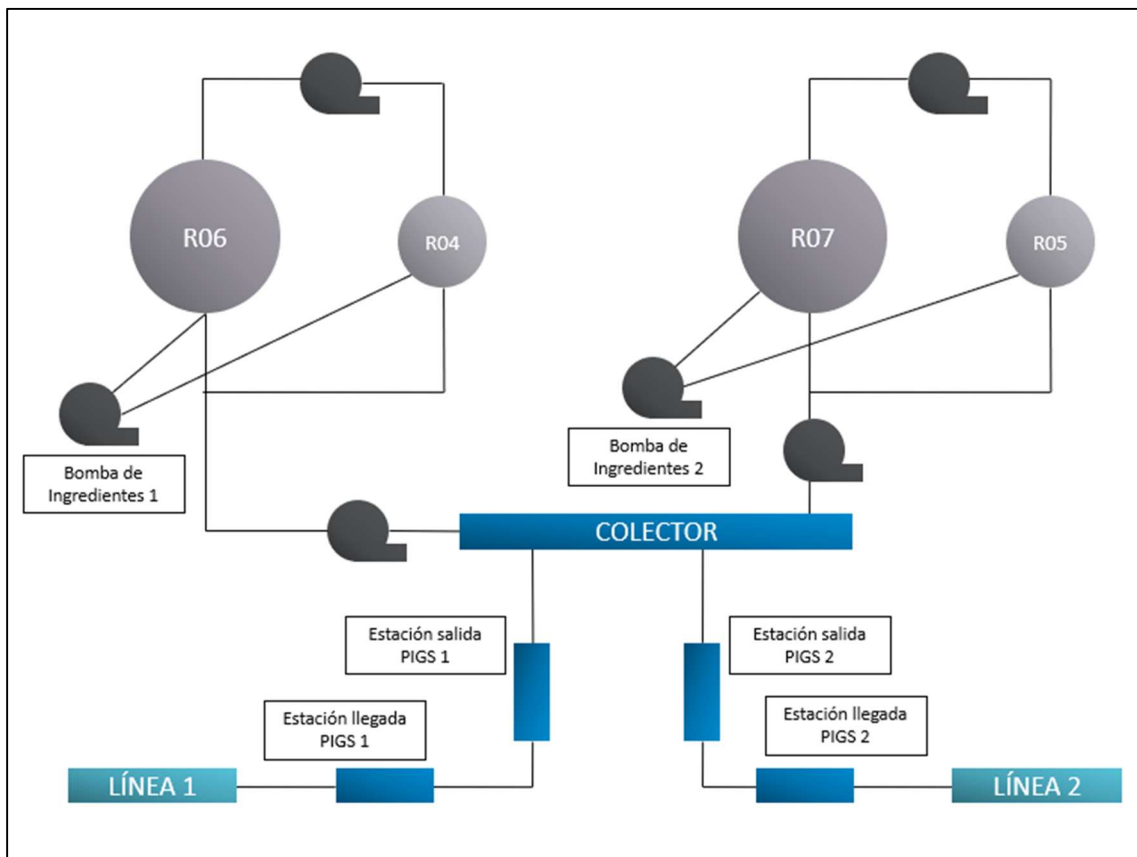


Ilustración 4: Esquema de las líneas de producción de la planta

2.4. PROCESO DE PRODUCCIÓN

En lo que se refiere a la parte de Procesos o "Making", el objetivo es obtener una mezcla homogénea a partir de una serie de materias primas, con las propiedades físicas deseadas. El

resultado de este proceso será una solución estable que cumpla con las características de desempeño buscadas.

En líneas generales, el proceso de mezclado para la producción de esta línea de aerosoles no es complejo, ya que las materias primas se mezclan fácilmente y es difícil que se separen en condiciones normales. El proceso de fabricación de la fórmula de aerosol se realiza en grandes tanques. En el tanque principal se prepara la fórmula de aerosol añadiendo las materias primas a la par que se homogeniza mediante un agitador.

2.4.1. Premezclado

Paralelamente o con anterioridad, en el tanque de premezclado, se prepara la mezcla de perfume que, una vez lista, se añade al tanque principal mediante una tubería dedicada exclusivamente a conectar estos dos tanques.

Este premezclado consiste en:

- **Perfume**
- **Solutos:** estos solutos no se especificarán para preservar la confidencialidad.

Las materias primas se añaden una a una según el orden estipulado por la empresa. Se conoce la duración aproximada de cada paso para la producción del premezclado, como se muestra en la Tabla 4.

Premezclado de perfume (550l)		
Orden	Materia Prima	Tiempo (min)
1	Perfume	5
Comenzar agitación a 60rpm		
2	Materia prima 1	3
3	Materia prima 2	4
4	Materia prima 3	1
Continuar agitando durante a 60rpm		15
Muestreo y análisis		23

Tabla 4: Proceso de producción del premezclado de perfume para un volumen de 550l

Antes de añadir el premezclado de perfume en el tanque principal, es necesario hacer un muestreo y análisis de la apariencia para comprobar que la adición y mezcla ha sido correcta y no desperdiciar así el perfume en una mezcla deficiente.

2.4.2. Fórmula principal

De igual forma que para el premezclado, para la producción de la fórmula principal se añaden una a una las materias primas. Por último, al terminar la adición y agitación de todas las materias primas, se hará un muestreo y análisis de las siguientes características:

- **Apariencia.** Debe de coincidir con el aspecto de la muestra tipo.
- **Olor.** Debe coincidir con el olor de la muestra tipo.
- **Densidad.** Dentro de los rangos estipulados.
- **pH.** Dentro de los rangos estipulados.

Fórmula principal (6T)		
Orden	Materia Prima	Tiempo (min)
1	Agua	11
2	Materia prima 1	2
3	Materia prima 2	2
	Agitar	1
4	Materia prima 3	2
	Agitar	1
5	Materia prima 4	2
	Agitar	1
6	Materia prima 5	1
	Agitar y recircular	5
7	Materia prima 6	3
	Agitar a 40rpm	7
8	Materia prima 7	3
9	Materia prima 8	2
	Muestreo y análisis	23

Tabla 5: Proceso de producción de la fórmula principal para un volumen de 6T

Los tiempos totales de producción de fórmula principal en función del tamaño de lote se muestran en la Tabla 6.

Tiempos de producción en función del tamaño de lote	
Tamaño de lote (T)	Tiempo (min)
4	57
6	66
20	140

Tabla 6: Tiempos de producción de fórmula en función de tamaño de lote

Para el llenado de las botellas, existe un tanque amortiguador previo a las cabezas de llenado. El objetivo de este tanque amortiguador es que no haya turbulencias ni burbujas de aire en el fluido cuando se llenan las botellas para que el llenado sea óptimo.

En el proceso de fabricación participan activamente **2 operarios** que se encargan de la introducción de las materias primas, así como del control del proceso.

2.4.3. Embotellado

Una vez se termina la preparación de la fórmula principal y los resultados de los análisis son positivos, ésta se bombea hacia la línea de embotellado correspondiente mediante las tuberías del colector. En la línea de embotellado se llenan las latas de aerosol con la fórmula correspondiente y a continuación se llenan de gas a presión y se sellan.

Cada una de las dos líneas cuenta con una llenadora idéntica, con capacidad para llenar 12.000 latas/hora.

Tiempos de embotellado en función del tamaño de lote	
Tamaño de lote (T)	Tiempo de embotellado (min)
4	55
6	85
20	275

Tabla 7: Estimación de tiempos de embotellado en función del tamaño de lote

Una vez se vacía el tanque principal, se activa el sistema de Pigs para vaciar las tuberías del colector y se llenan las últimas latas. Cuando se ha terminado de llenar la última lata se desechan los últimos restos de fórmula remanentes que se encuentran entre la estación de llegada de Pigs y se puede proceder a realizar la transición que sea necesaria.

2.4.4. Transición entre fórmulas

Dentro de la línea de aerosoles de esta empresa, existen 42 fórmulas distintas. Cuando se producen varias series de la misma fórmula seguidas, no hace falta ningún limpiado intermedio

entre series. Sin embargo, cuando hay un cambio de producción entre distintas fórmulas, antes de comenzar la producción de la siguiente fórmula, es necesario realizar una transición.

Para un cambio o entre dos fórmulas distintas existen dos tipos de transiciones:

- **Transición verde:** en este tipo de transición, se vacía el equipamiento de la fórmula previa y, mediante la utilización de los Pigs, previamente descritos en la sección de equipamiento, se empuja el remanente de la fórmula fuera de la tubería de transferencia que lleva a la línea de empaquetado.
- **Transición roja:** ésta requiere un proceso de limpieza y desinfección de todo el equipamiento y la línea de transferencia previo al comienzo de la producción de la siguiente fórmula.

El criterio para realizar una u otra es simple. Si el perfume de la fórmula previa es más fuerte que el de la fórmula que se va a producir a continuación, una Transición roja es necesaria. En caso contrario, se realizará una Transición verde. La razón es que, si el perfume es más fuerte, los restos de éste que quedan pueden acabar mezclados con la fórmula que se produce a continuación y contaminar su olor, haciendo que el producto final no cumpla con las características de calidad exigidas.

Para determinar si un perfume es más fuerte que otro, el equipo de I+D hace una prueba con cada combinación de fórmulas y determina la transición necesaria entre ellas.

El resultado de estas pruebas se recoge en la denominada matriz de transiciones, que recoge todos los cambios entre las distintas fórmulas. Si una prueba entre fórmulas no se ha realizado aún, se practica por defecto una transición roja (se marcarán en amarillo en la matriz para distinguirlas). Los elementos de la diagonal, como se ha comentado anteriormente, tienen valor nulo, pues no es necesaria transición entre producciones de la misma fórmula.

En la Ilustración 5 se muestra el aspecto de la matriz de transiciones. La matriz se encuentra adjunta en el Anexo 1.

The table is a transition matrix with the following structure:

- Columns (top):** Formula IDs: F001, F002, F003, F004, F005, F006, F007, F008, F009, F010, F011, F012, F013, F014, F015, F016, F017, F018, F019, F020, F021, F022, F023, F024, F025, F026, F027, F028, F029, F030, F031, F032, F033, F034, F035, F036, F037, F038, F039, F040, F041, F042, F043, F044, F045, F046, F047, F048, F049, F050.
- Rows (left):** Formula IDs: F001, F002, F003, F004, F005, F006, F007, F008, F009, F010, F011, F012, F013, F014, F015, F016, F017, F018, F019, F020, F021, F022, F023, F024, F025, F026, F027, F028, F029, F030, F031, F032, F033, F034, F035, F036, F037, F038, F039, F040, F041, F042, F043, F044, F045, F046, F047, F048, F049, F050.
- Cells:** Each cell contains a numerical value representing the transition requirement. The diagonal cells (where formula ID is the same) contain '0'. Other cells contain values like '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13', '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23', '24', '25', '26', '27', '28', '29', '30', '31', '32', '33', '34', '35', '36', '37', '38', '39', '40', '41', '42', '43', '44', '45', '46', '47', '48', '49', '50'. Some cells are highlighted in yellow, indicating a red transition is required.

Ilustración 5: Matriz de transiciones. Fuente: documentación interna de la empresa.

Por razones de limpieza de las líneas, también es necesario realizar al menos una limpieza o transición roja una vez por semana.

2.4.5. Limpieza y desinfección

La limpieza es definida como la acción de eliminar todo residuo remanente de fórmula o materia prima de la última producción. Se puede realizar mediante la recirculación en el equipo de agua caliente o agua tratada hasta que el equipamiento está limpio y sin restos de residuo. El método de comprobación del resultado es una inspección visual y de olor.

La desinfección es definida como la acción de reducir los microorganismos a un nivel tal que el riesgo de contaminación por microorganismos del producto fabricado en el equipo es mínimo.

El agua para ambos procesos debe ser agua tratada con Ozono.

Otras consideraciones a tener en cuenta relacionadas con el proceso de limpieza y desinfección son:

- Cuando el equipo ha sido desinfectado, la producción debe de comenzar antes de 8 horas.
- Es necesario limpiar y desinfectar el equipo al menos una vez por semana.
- Cuando el equipo está lleno más de 24 horas sin producción, es necesario hacer un test de microorganismos al producto una vez reanudada la producción para comprobar que no hay riesgo de contaminación.

A continuación, se detalla el proceso de limpieza y desinfección para el Tanque principal y el Tanque de premezclado, que se realiza en conjunto en ambos tanques. Tanto la solución de limpieza como la solución desinfectante son una solución de 70% Etanol y 30% Agua.

Procedimiento de limpieza	
1	Vaciar completamente ambos tanques
2	Preparar 100kg de solución limpiadora en el Tanque de premezclado
3	Preparar 100kg de solución limpiadora en el Tanque principal
4	Recircular los 200kg de solución limpiadora previamente preparados entre los dos tanques durante 5 minutos
5	Vaciar la solución limpiadora por gravedad a las tuberías de distribución

Tabla 8: Pasos del procedimiento de limpieza

Procedimiento de desinfección	
1	Preparar 300kg de solución desinfectante en el Tanque principal
2	Recircular la solución desinfectante entre los dos tanques durante 30 minutos
3	Cuando la recirculación termina, enviar toda la solución desinfectante al tanque principal
4	Enviar estos 300kg de solución a la línea de empaquetado y desecharla allí. Contar hasta 30 minutos y parar (aproximadamente 160kg habrán sido desechados)
5	Dejar las tuberías de distribución llenas de solución (140kg) durante 10 minutos
6	Vaciar de solución completamente los dos tanques
7	Preparar la nueva fórmula en el tanque principal. Enviar esta fórmula a la línea de empaquetado para empujar la restante solución desinfectante. "Flush" de aproximadamente 180kg

Tabla 9: Pasos del procedimiento de desinfección

2.5 PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LAS ÓRDENES DE PRODUCCIÓN

El proceso de planificación funciona de la siguiente manera: el departamento de planificación del envía a las 9:00 de la mañana a la subcontrata un documento Excel con la petición de la producción para las próximas 24 horas. Es decir, las fórmulas de aerosoles que se quieren producir y las cantidades de éstas. Dos horas más tarde, a las 11:00, ésta responde confirmando que tienen capacidad para producir esta demanda y las cantidades que van a producir finalmente. Esta producción se debe llevar a cabo en las próximas 27 horas. Al día siguiente, la subcontrata envía otra vez el archivo con las cantidades finalmente producidas.

Planificación de las órdenes de producción	
Hora	Acción
9:00	Envío de petición de producción para las próximas 24 horas
11:00	Envío de respuesta de confirmación de orden/ modificación de orden
14:00 (+1 día)	Envío de confirmación de finalización de producción con cantidades finales producidas

Tabla 10: Proceso de planificación y confirmación de las órdenes de producción

Estos tiempos tan cortos entre demanda y entrega se deben a la flexibilidad buscada para reducir al máximo el stock.

Cabe destacar que, durante este proceso, la empresa no impone a la subcontrata ninguna secuencia de producción, sino que es responsabilidad de ésta la secuenciación de las órdenes de producción.

2.6. DATOS DISPONIBLES

2.6.1. Matriz de transiciones

Como se menciona anteriormente, para documentar las transiciones entre cada fórmula de aerosol existe una matriz de transiciones. Ésta ha sido desarrollada por el equipo de I+D y es actualizada regularmente cuando nuevas fórmulas son introducidas o cuando una fórmula cambia de composición. Esta matriz ha sido creada en formato Excel. Cada casilla está coloreada de verde si se corresponde con esta transición y de rojo si es la contraria. La matriz no está completa, ya que algunas transiciones no han sido probadas en laboratorio, por lo que aparecen el color amarillo. Por defecto estas transiciones sin probar se realizarán en la práctica como Transiciones Rojas, para evitar riesgos de contaminación del perfume.

El archivo Excel tiene la siguiente estructura:

- Columna 1: nombre de la fórmula
- Columna 2: código del perfume
- Columna 3: código de la fórmula
- Fila 1: código de la fórmula
- De Fila 2-Columna 4 a Fila 43-Columna 46: matriz de transiciones

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. The columns are labeled with formula names (e.g., 'Formula 1', 'Formula 2', etc.) and perfume codes (e.g., 'Perfume 1', 'Perfume 2', etc.). The rows are labeled with formula codes (e.g., 'Formula 1', 'Formula 2', etc.). The main body of the spreadsheet is a grid of cells, each containing a numerical value representing a transition. The cells are color-coded: green for allowed transitions, red for disallowed, and yellow for untested. The grid is approximately 43 rows by 46 columns.

Ilustración 6: Aspecto del archivo Excel con la matriz de transiciones. Fuente: documentación interna de la empresa.

Para el uso de este archivo Excel en la herramienta informática creada en este trabajo, se ha realizado una modificación. El archivo original tan sólo marca con color verde la casilla correspondiente a una transición verde y con rojo la correspondiente a una transición roja.

Para disponer de más información dentro de la matriz, se ha introducido la duración en minutos de una transición verde en las casillas correspondientes y homológamente la duración de una transición roja en las casillas rojas. De este modo, se puede obtener una matriz con tiempos de transición a partir de este archivo.

20	20
	120
120	

Ilustración 7: Aspecto de las casillas de la matriz

Como se puede observar en la Ilustración 7, dentro de una casilla verde aparece registrada la duración de esta transición (20 minutos) y en una casilla roja la duración de una transición roja (120 minutos). En gris, los elementos de la diagonal, con valor cero. La matriz se ha adjuntado electrónicamente en el anexo.

2.6.2. Datos de producción

La subcontrata se encarga de secuenciar la producción demandada por el equipo de planificación. Ya que no hay ningún procedimiento definido por la empresa para secuenciar la producción de aerosoles, se pidió a la subcontrata que compartiera la secuencia de producción de un período de dos meses.

Ejemplo de datos de producción compartidos por la subcontrata

Fecha	Código de producto final	Código Fórmula	Tamaño de lote (kg)	Línea
1/10/2020	5121	1121	20000	1
1/10/2020	5121	1121	20000	1
1/10/2020	5161	1119	6000	1
1/10/2020	5175	1133	6000	1
1/10/2020	5142	1142	20000	2
1/10/2020	5173	1131	6000	2

Tabla 11: Ejemplo de datos de producción compartidos por la subcontrata

Los datos proporcionados en la secuencia en la que se produjeron fueron el código de producto final, el código de la fórmula (como se comenta anteriormente, una misma fórmula puede tener varios códigos finales según envase o país de comercialización), el tamaño del lote y la línea en la que fueron producidas.

2.6.3. Datos de disponibilidad y rendimiento

Como parte del control que se realiza de la subcontrata, ésta debe compartir semanalmente los datos de disponibilidad de las dos líneas. Estos datos recogen:

- Disponibilidad de las líneas.
- Tiempo planificado de parada.
- Tiempo no planificado de parada.
- Producción real.

Para los dos meses de producción (octubre y noviembre de 2020) de los que se proporcionaron datos, en la Tabla 12 se exponen los principales.

Resumen de datos octubre y noviembre 2020	
Disponibilidad	72%
Producción real	11.205.455 latas
Tiempo de producción	89.121 min
Paradas no planificadas	34.719 min
Paradas por transición¹	12.100 min

Tabla 12: Resumen de datos de disponibilidad

Gracias a estos datos podemos conocer la pérdida de disponibilidad de las líneas generada por las transiciones y podemos por lo tanto evaluar la mejora derivada de secuenciar la producción.

En cuanto a la eficiencia de las líneas, disponemos del dato del rendimiento promedio del proceso durante el período de tiempo del que se tienen datos, que es del 92%.

Hay que tener en cuenta que la planta trabaja a 3 turnos al día, los turnos tienen 8 horas de duración y se trabaja de lunes a viernes, no habiendo producción los fines de semana.

2.6.4. Residuos

Como ha sido mencionado en la sección 2.4.5. Limpieza y desinfección, para una Transición roja, es necesario un proceso de limpieza y desinfección (LyD) utilizando una solución limpiadora que se compone de 70% etanol y 30% agua. Una vez utilizada, esta solución es desechada. Ya que conocemos las cantidades a utilizar por cada Transición Roja, podemos evaluar la reducción de desecho de esta solución derivada de planificar la producción.

¹ Las paradas por transición se engloban dentro de las paradas no planificadas.

Esta reducción traerá consigo una reducción de costes pues, por un lado, se reduce el consumo de Etanol, con un precio en alza derivado de la crisis del Covid-19, y por otro lado se reduce el gasto de desechar esta solución. El gasto de desecho viene dado porque la solución, al contener un alto porcentaje de Etanol, se considera como un material peligroso, por lo que debe ser almacenado y trasladado a una empresa de gestión de residuos.

Conocemos el precio pagado por la subcontrata por el Etanol, que es de 1,07 €/kg. Este precio es efectivo a 1 de octubre de 2020, pudiendo fluctuar en el tiempo, ya que no hay un contrato a largo plazo con el proveedor, sino que se negocia el precio para cada pedido. En cuanto al gasto de desecho, no se ha podido obtener ningún dato sobre el coste derivado de la gestión del residuo.

Datos Transición roja	
Cantidad Total	500 kg
Agua	150 kg
Etanol	350 kg
Producto desechado	10,8 kg
Coste Transición roja	374,5 €

Tabla 13: Datos de cantidades y coste de transición roja

En cambio, para una Transición verde, la cantidad de desecho es considerablemente menor. Con anterioridad, para esta transición, el procedimiento era empujar los restos de la anterior fórmula producida que aún quedaban en las tuberías de distribución con la nueva fórmula producida. Esta mezcla se desechaba.

El procedimiento para evaluar cuando la nueva fórmula ya no tenía restos de la fórmula previa era cualitativo, comparando el olor. Un operario cogía una muestra de la mezcla que se estaba desechando y comparaba su olor con el de una muestra tipo de la fórmula entrante, si consideraba que el olor era el correcto, se paraba el desecho y empezaba el embotellado. Se evaluó que el desecho medio de este proceso era de 160kg.

Recientemente, un sistema de "Pigs" ha sido instalado, reduciendo al mínimo el desecho en una Transición verde. Este sistema se ha estimado durante la validación del sistema de Pigs que el desecho utilizando este equipo es de tan solo 10,8kg.

2.7 REVISIÓN LITERARIA

Para encontrar una solución al caso real que se plantea en este trabajo, se ha buscado un modelo matemático que se adapte a éste para poder resolverlo.

Se trata de un taller de máquinas en paralelo, las cuales son idénticas y pueden procesar todos los trabajos. Además, existen unos tiempos de preparación (o "Setup") que dependen de la secuencia ejecutada.

Del artículo "Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times" Fanjul-Peyro et al. (2018), se obtiene que este tipo de problema se puede modelizar como un Problema del viajante, en concreto de la variante de múltiples viajeros.

En el Capítulo 3 se analiza con más detalle este tipo de problema y la forma de adaptarlo a nuestro caso concreto.

CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO

3.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se detalla el modelo matemático utilizado para resolver el problema planteado en este trabajo. Se trata de un problema de secuenciación de la producción, con una serie de trabajos a realizar, con precedencias entre los trabajos y una serie de máquinas donde se pueden realizar los trabajos.

- Existe un conjunto de trabajos independientes que tienen que ser procesados una sola vez.
- Se trata de un taller de máquinas en paralelo, con dos máquinas idénticas.
- Los trabajos pueden ser procesados indistintamente en ambas máquinas.
- El tiempo de procesado para cada trabajo es independiente de la máquina.
- Las máquinas pueden procesar solamente un trabajo a la vez.
- Cada trabajo tiene que ser asignado a una sola máquina.
- Existen unos tiempos de preparación previos al procesado de cada trabajo, que dependerán de la precedencia a este trabajo. es decir, dependerán de la secuencia de trabajos en cada máquina.
- Los tiempos de preparación son independientes a la máquina.

El objetivo es buscar una solución óptima para el orden de ejecución de estos trabajos en las máquinas con el fin de reducir el tiempo de procesamiento del conjunto. Para ello, podríamos proponer como primera opción probar todas las posibles secuencias de trabajos con el fin de buscar la secuencia óptima. Sin embargo, se trata de un problema en el que el número de combinaciones es igual al factorial del número de trabajos, por lo que, cuando el número de trabajos a realizar crece, el problema se vuelve demasiado costoso en términos computacionales.

Se propone pues, plantear el problema a partir del modelo del Viajante, "TSP" por sus siglas en inglés (Travelling Salesman Problem).

La base de este problema es la siguiente: un viajante tiene que pasar por todas las ciudades de una región, y quiere recorrer la menor distancia posible. Todas las ciudades están conectadas entre sí y conocemos la distancia entre ellas. Se plantea un problema de optimización del que obtendremos una ruta que pasa por todas las distancias recorriendo la menor distancia posible.

En el caso particular de este problema en vez de un viajero tendremos dos, lo que convierte este problema en "m-TSP" (multiple Travelling Salesmen Problem). Las máquinas serían los viajeros, que tienen que "recorrer" todos los trabajos (que serían las ciudades). Tendríamos por lo tanto 2 viajeros. Además, las ciudades tienen que ser visitadas por uno, y solo uno, de los viajeros.

A partir de estas premisas y basándose en el modelo descrito por Fanjul-Peyro et al. (2018), que a su vez parte del modelo propuesto por Avalos-Rosales, et al. (2015) se plantea el modelo matemático para representar el caso real que se plantea. De las restricciones que se van a exponer en los siguientes apartados, de la Restricción 1 a la Restricción 5, así como la Ecuación 1: Función objetivo, se basan en el modelo de Avalos-Rosales, et al. (2015).

La Restricción 6, ha sido ampliamente utilizada para evitar recorridos secundarios Ávalos-Rosales et al. (2015) desde su propuesta por Miller, et al. (1960).

La Restricción 8 es propuesta por Fanjul-Peyro et al. (2018) mientras que la Restricción 7 es planteada por Kara et al. (2006).

Por último, la Restricción 9 es desarrollada dentro de este proyecto para adaptar el modelo de restricciones a la realidad del caso que en este documento se presenta.

3.2. DATOS DEL PROBLEMA

En este apartado se describen qué datos de entrada se plantean para el problema, así como su nomenclatura.

Lista de trabajos a secuenciar, donde n es el número total de trabajos a secuenciar.

$$N = \{1, 2, \dots, n\} \text{ con índice } j, k.$$

Se incluye un "Dummy Job" o trabajo ficticio como inicio de la secuencia. Este trabajo tiene tiempo de procesamiento y precedencias igual a 0:

$$N_0 = \{0\} \cup N$$

Lista de máquinas que van a procesar los trabajos. En este caso particular tendremos 2 máquinas como ha sido comentado anteriormente.

$$M = \{1, 2\} \text{ con índice } i.$$

Matriz de tiempos de proceso. Esta matriz contiene los tiempos de procesamiento de todos los trabajos a secuenciar. En este caso particular sólo habrá un tiempo de procesamiento por trabajo, ya que será el mismo para ambas máquinas.

$$P \in \mathbb{R}^{(m \cdot (n+1))}$$

Matriz de tiempos de transición. Esta matriz contiene los tiempos de transición o "setup" entre los distintos trabajos.

$$S \in \mathbb{R}^{(m \cdot (n+1) \cdot (n))}$$

3.3. VARIABLES

Se definen las siguientes variables para resolver el problema:

- $X_{ijk} = 1$ si el trabajo k es el sucesor de j en la máquina i , 0 de lo contrario.
- $Y_{ij} = 1$ si el trabajo j es procesado en la máquina i , 0 de lo contrario.
- $C_j \geq 0$ es el tiempo de finalización del trabajo j .

- $U_j \geq 0$ es el número de trabajos procesados antes que j en la máquina donde j es procesado.

Las variables X_{ijk} e Y_{ij} son binarias.

Como ejemplo, teniendo dos trabajos $j = 1, k = 2$ que son procesados en la máquina $i = 1$; si k es el sucesor de j en la máquina 1, entonces:

- $X_{112} = 1$
- $Y_{11} = 1$
- $Y_{12} = 1$
- $U_2 = U_1 + 1$

3.4. FUNCIÓN OBJETIVO

A continuación, se presenta la función objetivo de este problema de la cual se pretende minimizar su valor.

$$\min C_{max}$$

Ecuación 1: Función objetivo

Siendo C_{max} el máximo de los tiempos de finalización de los trabajos.

3.5. RESTRICCIONES

3.5.1. Restricción 1

$$\sum_{j \in N_0, k \in N, k \neq j} s_{ijk} \cdot X_{ikj} + \sum_{j \in N} p_{ij} \cdot Y_{ij} \leq C_{max}, \quad i \in M$$

Restricción 1

El significado de esta restricción es el siguiente: la suma de los tiempos de procesamiento de los trabajos procesados en la máquina i más la suma de los tiempos de transición entre éstos tiene que ser igual o menor al máximo de los tiempos de finalización de los trabajos.

3.5.2. Restricción 2

$$\sum_{k \in N} X_{i0k} \leq 1, \quad i \in M$$

Restricción 2

Esta segunda restricción asegura que, como mucho, un trabajo va a ser programado en cada máquina después del "Dummy Job".

3.5.3. Restricción 3

$$\sum_{i \in M} Y_{ij} = 1, \quad j \in N$$

Restricción 3

Con esta tercera restricción aseguramos que todos los trabajos están asignados a una y solo una máquina.

3.5.4. Restricción 4

$$Y_{ij} = \sum_{k \in N_0, j \neq k} X_{ijk}, \quad i \in M, j \in N$$

Restricción 4

Este set de restricciones asegura que si el trabajo j está asignado en la máquina i , entonces éste debe tener al menos un sucesor en la máquina i .

3.5.5. Restricción 5

$$Y_{ij} = \sum_{j \in N_0, j \neq k} X_{ijk}, \quad i \in M, k \in N$$

Restricción 5

Mediante esta restricción aseguramos que si el trabajo k está asignado en la máquina i , entonces éste debe tener al menos predecesor en la máquina i .

3.5.6. Restricción 6

El set de restricciones 6 es necesario para evitar los "recorridos secundarios" o "subtours" en inglés. Estos recorridos secundarios son roturas de la linealidad de la secuencia de trabajos, que consisten en la aparición de recorridos independientes dentro de la secuencia.

Por ejemplo, si un viajante tiene que visitar 6 ciudades y generamos una secuencia en la que aparecen recorridos secundarios, podría aparecer un recorrido que nos lleve por las ciudades 1, 2 y 3, acabando el recorrido de nuevo en la ciudad 1 y otro que nos llevara por las ciudades 4, 5 y 6 para acabar en la ciudad 4. Por lo tanto, tendríamos 2 recorridos secundarios que recorren todas las ciudades, pero no están conectados entre sí, por lo que la secuencia no sería válida.

Con estas restricciones buscamos pues, evitar los recorridos secundarios y que las secuencias tengan carácter lineal.

$$U_j - U_k + n \cdot \sum_{i \in M} X_{ijk} \leq (n - 1), \quad j, k \in N, j \neq k$$

Restricción 6

Por lo tanto, la restricción 6 obliga a que, si k es la sucesora de j en la máquina i , entonces $U_k - U_j \geq 1$.

3.5.7. Restricción 7

Las Restricciones 7 y 8 buscan delimitar los posibles valores de la variable U . Si tuviéramos una sola máquina, la variable U tomaría valores de 0 a $n - 1$, pero al tener más de una máquina, U sólo tomaría valores de 0 a $n - 1$ si todos los trabajos fueran procesados por tan solo una de las máquinas. De no ser así, podría tomar diferentes valores, por ejemplo, de un set de 10 trabajos, para los tres trabajos procesados en la máquina 1, U podría tomar los valores (0,1,2) o (7,8,9). Para evitar esto, se introducen las restricciones 7 y 8.

$$U_j + \sum_{i \in M} X_{i0j} \geq 1, \quad j \in N$$

Restricción 7

El significado de la Restricción 7 es el siguiente: si un trabajo j no es el primero en ser procesado en cualquiera de las máquinas, entonces el valor de U_j deberá ser mayor o igual a 1.

3.5.8. Restricción 8

$$U_j + (n - 1) \cdot \sum_{i \in M} X_{i0j} \leq (n - 1), \quad j \in N$$

Restricción 8

En cuanto a la Restricción 8, ésta obliga a que si un trabajo j es el primero en cualquiera de las máquinas, el valor de la variable U_j sea igual a 0.

3.5.9. Restricción 9

Por último, existe una restricción particular del problema planteado en este trabajo. Debido a que la orden de producción se realiza diariamente, la programación se debe realizar teniendo en cuenta que, necesariamente, el último trabajo procesado en la máquina i de la anterior orden deberá ser el primero de la nueva secuencia, optimizando así, el tiempo de transición entre este último trabajo de la anterior orden y los trabajos de la nueva orden.

Para ello, se ha definido que:

- el último trabajo de la orden previa en la **máquina 1** deberá ocupar la primera posición (índice 1) de la nueva orden.
- el último trabajo de la orden previa en la **máquina 2** deberá ocupar la segunda posición (índice 2) de la nueva orden.

Teniendo en cuenta esto, se define la siguiente restricción para que estos dos trabajos sean los primeros de la secuencia en las máquinas 1 y 2 respectivamente:

$$Y_{11} + Y_{22} + X_{101} + X_{202} = 4$$

Restricción 9

Debido a que las variables X e Y son binarias, se puede deducir pues que:

- $Y_{11} = 1$
- $Y_{22} = 1$
- $X_{101} = 1$
- $X_{202} = 1$

3.6. MODELO MONOMÁQUINA

En el programa informático también tendremos que resolver un problema monomáquina modelado como un problema del viajante (TSP), en el que tendremos tan sólo una máquina para procesar una serie de trabajos. Este modelo cambia por tanto su estructura matemática.

Este modelo parte de la base del presentado por Avalos-Rosales, et al. (2015) pero ha sido modificado para este proyecto con el objeto de simplificarlo para una sola máquina.

El objetivo de definir un segundo modelo monomáquina viene dado por la necesidad de optimizar el resultado del primer modelo. En este primer modelo se obtiene una asignación de trabajos para cada máquina y se optimiza el tiempo máximo de finalización de los trabajos, optimizando de esta manera el conjunto global de ambas máquinas (o líneas de producción, como se nombran en otros apartados).

Sin embargo, puede darse el caso de que una de las máquinas no tenga un resultado óptimo, puesto que el valor del tiempo máximo de finalización de los trabajos procesados en ella pueda ser menor que el tiempo máximo de finalización de la otra línea, que sería el global ($C_{max} \leq C_{max2} = C_{max\ global}$).

Así pues, se resolverá primero un modelo global en el que se obtendrá la asignación de trabajos a cada máquina y a continuación un modelo individual para cada una de las dos máquinas con el objetivo de obtener el óptimo local.

3.6.1. Datos del modelo monomáquina

Los datos y nomenclatura que se utilizan para este problema son similares al problema de máquinas en paralelo.

Lista de trabajos a secuenciar, donde n es el número total de trabajos a secuenciar en la máquina:

$$N = \{1, 2, \dots, n\} \text{ con índice } j, k.$$

Dummy Job:

$$N_0 = \{0\} \cup N$$

Se incluye un "Dummy Job" como inicio de la secuencia. Este trabajo tiene tiempo de procesamiento y precedencias igual a 0.

Matriz de tiempos de proceso. Esta matriz contiene los tiempos de procesamiento de todos los trabajos a secuenciar.

$$P \in \mathbb{R}^{(n+1)}$$

Matriz de tiempos de transición. Esta matriz contiene los tiempos de transición o "setup" entre los distintos trabajos.

$$S \in \mathbb{R}^{((n+1) \cdot (n+1))}$$

3.6.2. Variables del modelo monomáquina

Se definen las siguientes variables para resolver el problema:

- $X_{ij} = 1$ si el trabajo j es el sucesor de i , 0 de lo contrario.
- $C_i \geq 0$ es la posición del trabajo i en la secuencia.

La variable X_{ij} es binaria mientras que la variable C_i es positiva y entera.

3.6.3. Función Objetivo modelo monomáquina

$$\min \sum_{i \in N_0, j \in N, j \neq i} s_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_{i \in N} p_i$$

Ecuación 2: Función objetivo modelo monomáquina

La función objetivo será el sumatorio de la multiplicación de los tiempos de transición s_{ij} por la variable X_{ij} , que marca si existe precedencia entre trabajos, más el sumatorio de los tiempos de procesado de todos los trabajos, pues todos serán procesados en esta máquina y estos tiempos no dependen del orden de la secuencia.

3.6.4. Restricción 1 modelo monomáquina

$$\sum_{i \in N_0} X_{ij} = 1, \quad i \in N_0$$

Restricción 10: Restricción 1 modelo monomáquina

Esta restricción asegura que todos los trabajos tienen al menos un sucesor, incluido el "Dummy Job".

3.6.5. Restricción 2 modelo monomáquina

$$\sum_{i \in N_0} X_{ij} = 1, \quad i \in N_0$$

Restricción 11: Restricción 2 modelo monomáquina

Esta restricción asegura que todos los trabajos tienen al menos un predecesor. No es necesario incluir que el "Dummy Job" tenga necesariamente un predecesor.

3.6.6. Restricción 3 modelo monomáquina

$$C_i - C_j + V \cdot (1 - X_{ij}) \geq 1, \quad i \in N_0, j \in N$$

Restricción 12: Restricción 3 modelo monomáquina

La restricción 3 determina que si el trabajo j es el sucesor del trabajo i en la secuencia, entonces la posición del trabajo j será mayor que la posición del trabajo i en una unidad. Por ejemplo, si el trabajo i es el tercero de la secuencia y el trabajo j es su sucesor, entonces $C_i = 3$ y $C_j = 4$.

3.6.7. Restricción 4 modelo monomáquina

$$C_i \geq n, \quad i \in N$$

Restricción 13: Restricción 4 modelo monomáquina

Esta ecuación limita el valor máximo de C_i al número de trabajos a secuencia.

3.6.8. Restricción 5 modelo monomáquina

Al igual que sucede para el problema de máquinas en paralelo, para el caso particular de este trabajo se busca que el primer trabajo de la lista sea el primero de la secuencia. Por ello se añade la Restricción 14: Restricción 5 modelo monomáquina:

$$X_{01} = 1$$

Restricción 14: Restricción 5 modelo monomáquina

De este modo forzamos a que el primer trabajo de la lista sea el sucesor del "Dummy Job".

CAPÍTULO 4: PROGRAMA INFORMÁTICO

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez definido la formulación matemática que se va a utilizar para resolver de forma exacta el problema, se ha procedido a plasmar éste en forma de programa informático para su resolución de forma automática. Para ello se ha escogido programar el problema utilizando el lenguaje de programación Python.

4.2. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

A continuación, se enumeran las diferentes herramientas que se han utilizado para la formulación y resolución del problema informáticamente.

4.2.1. Python

Es el lenguaje de programación que se ha elegido para desarrollar el programa. La elección se debe a que se trata de un código abierto, por lo que no es necesario realizar un desembolso económico, y que dispone de una gran variedad de bibliotecas con paquetes de software libre para utilizar, lo que lo hace idóneo para este problema (Python Software Foundation, 2021).

4.2.2. Pyomo

Pyomo se trata de una colección de paquetes para formular modelos de optimización en Python. Se trata también de software de código abierto. Fue desarrollado por Hart et al. (2017).

Pyomo soporta un amplio espectro de problemas entre los que se encuentran los problemas lineales, que son el objeto de este trabajo. La función de Pyomo es definir el problema que se quiere optimizar, que luego será resuelto con un solucionador o "solver".

4.2.3. Spyder

Spyder es un entorno de desarrollo integrado (IDE por sus siglas en inglés) de código abierto para Python. Creado por Pierre Raybaut, ha sido diseñado para científicos, ingenieros y analistas de datos (Spyder Website, 2020). Es el entorno escogido para desarrollar el código informático de la herramienta desarrollada.

4.2.4. Gurobi

Gurobi Optimizer es un software de optimización para Programación Lineal (LP, por sus siglas en inglés), cuadrática (QP), restringida cuadráticamente (QCP), lineal entera mixta (MILP), cuadrática entera mixta (MIQP) y programación restringida cuadráticamente entera mixta (MIQCP). Fue desarrollado por Zonghao Gu, Edward Rothberg y Robert Bixby (Gurobi Optimization, LLC., 2021).

Después de plantear el problema utilizando el paquete Pyomo, definiremos que éste debe utilizar Gurobi como solver y devolver el resultado de la optimización, que nos dará la solución exacta al problema planteado.

Se ha utilizado la licencia de estudiantes de este "solver".

4.2.5. GLPK

Se trata de otro paquete de software (otro solver) para solucionar modelos de Programación Lineal (Makhorin, 2012). Fue desarrollado por Andrew O. Makhorin y forma parte del proyecto GNU, un proyecto colaborativo de software libre con el objetivo de crear un sistema operativo completamente libre. Utiliza el método de ramificación y acotación y el método de los cortes enteros mixtos de Gomory para problemas enteros (Wikipedia, 2021).

Lo utilizaremos para evaluar la capacidad de resolución de problemas de la herramienta desarrollada. Se trata de software de código abierto.

4.2.6. Microsoft Excel

Como se ha mencionado anteriormente, la matriz en la que se recogen las transiciones entre fórmulas se encuentra en formato Excel. Por ello, se ha decidido crear un archivo Excel en el que, además de esta matriz, exista otra pestaña en la que se puedan introducir las fórmulas que queremos secuenciar y se obtenga una matriz de transiciones reducida, que contenga tan sólo las transiciones entre las fórmulas elegidas.

4.3. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

En este apartado se va a describir la estructura del programa, dividiendo éste en diferentes secciones con una función concreta.

4.3.1. Importación de módulos

En esta sección se importan los módulos utilizados en el programa, que son los siguientes:

- **Pyomo:** como es mencionado anteriormente, es el módulo que nos permite escribir el problema para que luego el solver escogido lo resuelva.
- **SolverFactory:** es el repositorio de solvers que viene incluido en Pyomo.
- **Value:** nos permitirá visualizar el valor de la función objetivo una vez resuelto el problema.
- **Numpy:** es una biblioteca con funciones para la creación y el cálculo de matrices y vectores.

```

19  ##-----##
20  ##IMPORT MODULES##
21
22  # Import of the pyomo module
23  from pyomo.environ import *
24  from pyomo.opt import SolverFactory
25  from pyomo.environ import value
26
27  #Import numpy
28  import numpy as np

```

Ilustración 8: Importación de módulos

4.3.2. Importación de datos

En esta sección se importan los datos que se utilizan para resolver el problema, que son:

- **Matriz de transiciones reducida**
- **Matriz de tiempos de procesado**

La matriz de transiciones reducida se trata de una matriz que contiene únicamente los elementos de la matriz correspondientes a las fórmulas a secuenciar más los correspondientes al “Dummy Job”. Es necesaria para la posterior resolución del modelo.

La matriz de tiempos de procesado contiene los tiempos de procesado del “Dummy Job” y las fórmulas a secuenciar.

Estos datos se importan de sendos archivos en formato *txt* y se convierten en matrices en formato Numpy.

4.3.3. Definición del modelo y rangos de los datos

En esta sección se define el modelo matemático. Se utiliza para ello la estructura de definición de problemas de Pyomo.

En primer lugar, se le da nombre al modelo y se define si es un modelo concreto o abstracto. Se ha definido como nombre del modelo “model”.

Pyomo diferencia entre modelos abstractos, en los que los parámetros no tienen valores definidos, y modelos concretos, en los que los parámetros tienen valores concretos (Sandia National Laboratories, 2017). En este caso se definirá como un modelo concreto.

Ejemplo de modelo concreto:

$$\begin{aligned}
 \min & 8x_1 - 3x_2 \\
 & 5x_1 + 3x_2 \geq 4 \\
 & x_1, x_2 \geq 0
 \end{aligned}$$

Ilustración 9: Ejemplo de modelo concreto

Ejemplo de modelo abstracto:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot x_i &\geq \beta_i \\ x_i &\geq 0 \\ \forall i &= 1 \dots n \end{aligned}$$

Ilustración 10: Ejemplo de modelo abstracto

En segundo lugar, se definen los rangos de los datos. En este caso los rangos serán 2 para las máquinas, el número de fórmulas a secuenciar y este último más el “Dummy Job”.

```

55  ##-----##
56  ##DEFINE MODEL##
57
58  #Model
59  model = ConcreteModel()
60
61  ##-----##
62  ##DEFINIR RANGOS DE LAS VARIABLES##
63
64
65  #number of machines(lines)
66  model.n_lines= RangeSet(2)
67
68
69  #Range N0
70  model.N0 = RangeSet(n)
71
72  #Range N (without the Summy Job)
73  model.N = RangeSet(2,n)

```

Ilustración 11: Definición del modelo y rangos

4.3.4. Definición de variables y parámetros

En esta sección se definen las variables del problema modelizado. Éstas son las ya mencionadas en la descripción del modelo matemático, pero con una modificación en la variable X debido a las características de Pyomo.

Las variables en Pyomo solo permiten tener dos índices. Puesto que la variable X se ha definido en el modelo matemático con 3 índices (i para la máquina, j para el trabajo 1 y k para el trabajo 2), ésta se ha dividido en dos, una para la primera máquina (X_1) y otra para la segunda (X_2), utilizando los índices de Pyomo para identificar las fórmulas.

- X_1 : variable binaria que define la sucesión entre fórmulas en la máquina 1 (o línea 1).
- X_2 : variable binaria que define la sucesión para la máquina 2 (o línea 2).
- Y : variable que define en qué máquina se procesa cada fórmula.
- U : variable que define la posición de la fórmula en la secuencia para la máquina en la que es procesado.
- C_{max} : tiempo máximo de finalización de procesamiento de las fórmulas.

```

77  ##-----##
78  ##DECISION VARIABLES##
79
80  #Decision variables xijk:
81  #For line 1:
82  model.x1 = Var(model.N0,model.N0, within=Binary)
83
84  #For line 2:
85  model.x2 = Var(model.N0,model.N0, within=Binary)
86
87  #Decision variables yij
88  model.y = Var(model.n_lines, model.N0, within=Binary)
89
90  #Dummy variable ui
91  model.u = Var(model.N, within=NonNegativeIntegers)
92
93  #Cmax
94  model.Cmax = Var(within=NonNegativeReals)

```

Ilustración 12: Declaración de variables

Los parámetros en Pyomo serán los datos (matriz de transiciones reducida y matriz de tiempos de procesado) que hemos importado anteriormente, declarándolos como elementos del modelo que se está generando.

- S : matriz de transiciones reducida.
- P : matriz de tiempos de procesado.

4.3.5. Definición de la función objetivo, restricciones y resolución del modelo

Se define la función objetivo, que en este caso será C_{max} , y el sentido de la misma, que será minimizar.

Así mismo, se definen las restricciones del modelo según la estructura y nomenclatura de Pyomo. Serán las mismas restricciones que las definidas en el modelo matemático.

Primero se define la inequación y a continuación se declara la restricción.

```

138  #Constraint 2 {2} (máquina 2)
139  def rule_const22(model):
140      return sum(model.x2[1,k] for k in model.N) <= 1
141
142  model.const22 = Constraint(rule=rule_const22)

```

Ilustración 13: Ejemplo de declaración de restricción en Pyomo

Como último paso de este apartado se ejecuta el solver elegido para resolver el modelo. En este proyecto se ha elegido, como se menciona anteriormente, el solver Gurobi. Al ejecutarse, este solver resuelve el modelo declarado mediante Pyomo.

4.3.6. Separación de resultados por líneas

Una vez resuelto el modelo, tenemos un valor para el tiempo máximo de finalización del procesado y un set de fórmulas para cada máquina. Habremos, por lo tanto, optimizado el

problema en su conjunto. Sin embargo, esto no nos asegura que ambas líneas por separado estén optimizadas. Una máquina será el cuello de botella y estará optimizada mientras que la otra podría ser optimizada por separado y obtener un tiempo de finalización menor que la otra máquina.

Por ello, obtendremos el set de fórmulas para cada máquina de la resolución del primer modelo y crearemos un modelo en Pyomo basado en el modelo matemático definido en el apartado 3.6. modelo monomáquina para cada una de las dos líneas. Con la resolución de estos dos modelos individuales obtendremos de forma exacta el problema optimizado para cada una de las dos líneas por separado.

El primer paso será extraer de los resultados obtenidos por Gurobi las fórmulas a secuenciar en la línea 1 y las fórmulas a secuenciar en la línea 2, organizándolas en dos listas.

```
275  ##-----##
276  #Separar los trabajos que van en la máquina 1 de los que van en la máquina 2
277
278  list_machine1=[]
279  list_machine2=[]
280  l3 = list(model.y.keys())
281  for i in l3:
282      if model.y[i]() != 0:
283          if i[0] == 1:
284              list_machine1.append(int(i[1]))
285          else:
286              list_machine2.append(int(i[1]))
```

Ilustración 14: Obtención de listas de fórmulas a procesar en cada línea

4.3.7. Obtención de las matrices reducidas para cada máquina

Como vamos a crear dos problemas por separado, deberemos también crear matrices por separado para el set de fórmulas de cada línea.

A partir de la matriz de la matriz de transiciones reducida creada para resolver el problema de máquinas en paralelo, obtendremos dos matrices:

- Una matriz de transiciones reducida para la línea 1, aislando los términos del set de fórmulas de esta máquina.
- Una segunda matriz de transiciones para la línea 2, aislando los términos para este segundo set.

De igual manera, obtendremos dos matrices de tiempos de procesado a partir de la matriz de tiempos de procesado creada para el problema de máquinas en paralelo resuelto en la primera parte del programa:

- Una matriz de tiempos de procesado para el set de fórmulas de la línea 1.
- Una matriz de tiempos de procesado para el set de la línea 2.

4.3.8. Definición del modelo y rangos de las variables monomáquina

Primeramente, se resuelve el modelo monomáquina para la línea 1 (o máquina 1). Para ello, al igual que en el problema de taller de máquinas en paralelo, se definirá el modelo según el esquema que requiere Pyomo.

Seguidamente se resolverá el problema monomáquina para la línea 2. La estructura y modelo serán idénticos a los de la línea 1, solo cambiarán el set de fórmulas y las matrices de transiciones y tiempos de procesado, que serán las creadas en la obtención de las matrices reducidas para cada máquina respectivamente.

Al igual que en el modelo de máquinas en paralelo, se comienza por definir el modelo como concreto y a darle un nombre. A continuación, se definen los rangos de las variables de decisión, que serán dos: el número de fórmulas a secuenciar y éste más el "Dummy Job".

```

347     ##-----##
348     ##DEFINE MODEL FOR MACHINE 1##
349
350     #Model for Machine 1
351     model1 = ConcreteModel()
352
353     #Indexes for the matrix.
354     #rows
355     model1.N01 = RangeSet(n1)
356     #columns
357     model1.N1 = RangeSet(2,n1)
    
```

Ilustración 15: Definición del modelo y rangos para la línea 1

4.3.9. Definición de variables y parámetros monomáquina

Como en el anterior modelo, se definen las variables, que en este caso serán las definidas en el apartado 3.6. modelo monomáquina.

- **X**: variable binaria que define la sucesión entre fórmulas.
- **C**: variable que define la posición de la fórmula en la secuencia.

Como es mencionado anteriormente, los parámetros serán las matrices específicas de la línea (línea 1 o línea 2 según estemos resolviendo uno u otro modelo) creadas en el paso de obtención de las matrices reducidas para cada máquina:

- **S**: matriz de tiempos de transición.
- **P**: matriz de tiempos de procesado.

4.3.10. Definición de la función objetivo, restricciones y resolución del modelo monomáquina

A continuación, se define la función objetivo. Se busca minimizar el valor de la Ecuación 2: Función objetivo modelo monomáquina, definida en el apartado 3.6. modelo monomáquina.

Se definen las 5 restricciones del problema, incluyendo la Restricción 14: Restricción 5 modelo monomáquina, que fuerza al primer trabajo de la lista a ser el primero de la secuencia. Para la línea 2 también será el primero de su lista. Esta restricción se muestra como ejemplo a continuación.


```
419 #Constraint 5
420 def rule_const5(model1):
421     return model1.x[1,2] == 1
422
423 model1.const5 = Constraint(rule=rule_const5)
```

Ilustración 16: Representación en Pyomo restricción 5 del modelo monomáquina

Como en el caso del problema de máquinas en paralelo, en el último paso de esta sección se llama al solver Gurobi para resolver el modelo.

4.3.11. Obtención y visualización de resultados

Finalmente, una vez resueltos los dos modelos monomáquina planteados para las líneas 1 y 2, se agrupan los resultados de salida que devuelve el solver. A continuación, se enumeran los datos de salida que se presentan al final del programa.

- Valor del tiempo de finalización de procesamiento (C_{max}) global.
- Fórmulas a procesar en la línea 1.
- Fórmulas a procesar en la línea 2.
- Secuencia de procesamiento de la línea 1.
- Valor del tiempo de finalización de procesamiento (C_{max}) de la línea 1.
- Secuencia de procesamiento de la línea 2.
- Valor del tiempo de finalización de procesamiento (C_{max}) de la línea 2.

Estos datos son presentados en la consola del ordenador o del editor de Python que se esté utilizando. En la Ilustración 17: Ejemplo de visualización de resultados se muestra un ejemplo de la visualización de resultados.

```
-----Resumen de resultados-----
-----Resultados Globales-----
Valor de Cmax global= 580.0
trabajos en la Máquina 1: [0, 1, 5, 6, 8, 9, 10]
trabajos en la Máquina 2: [0, 2, 3, 4, 7]

-----Resultados Máquina 1-----
Valor de Cmax para la Máquina 1= 561.0
Secuencia de trabajos en la Máquina 1: [0, 1, 10, 9, 5, 6, 8]

-----Resultados Máquina 2-----
Valor de Cmax para la Máquina 2= 580.0
Secuencia de trabajos en la Máquina 2: [0, 2, 7, 4, 3]
```

Ilustración 17: Ejemplo de visualización de resultados

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez desarrollado el programa informático, se busca evaluar el impacto de la utilización de esta herramienta en la empresa. Para ello compararemos los datos disponibles de producción durante 2 meses de 2020 con una simulación de esa misma producción utilizando este programa.

Disponemos del registro de producción de octubre y noviembre de 2020. En él están reflejadas las fórmulas que fueron producidas en ese período, así como la secuencia en la que fueron procesadas.

Las órdenes de producción lanzadas a la subcontrata por el departamento de planificación de la empresa se realizan de manera diaria. La subcontrata recibe la orden, envía la confirmación de la capacidad de la planta de producir esos requerimientos y a continuación dispone de un plazo de 27 horas para finalizar la producción de esta orden.

El proceso de manera detallada es el siguiente: el equipo de planificación decide, en función de la demanda del cliente, la producción para la siguiente orden. A las 10:00 de la mañana envía la orden a la subcontrata.

La subcontrata dispone de 1 hora, hasta las 11:00, para responder aceptando, denegando o proponiendo cambios en la orden. A las 12:00 debe de estar cerrada la planificación. A partir de las 12:00 la subcontrata dispone de 27 horas para acabar la producción acordada. Una vez finalizada, responde al equipo de planificación devolviendo el documento de la orden con las cantidades finales producidas.

El objetivo es simular para el período de tiempo en el que disponemos de datos, este procedimiento, pero utilizando la herramienta desarrollada para secuenciar la producción. De este modo compararemos la secuencia en este período real con la simulada y evaluaremos la mejora.

Debido a que las fórmulas a secuenciar son las mismas, buscaremos analizar la diferencia en el número de transiciones rojas entre ambas secuencias, lo que también se verá reflejado en el número de horas de paro de las líneas por transición y por tanto en disponibilidad y eficiencia de la línea.

Destacar que los resultados obtenidos se muestran en conjunto para las dos líneas.

5.2. PARÁMETROS PARA LOS CÁLCULOS

Antes de comenzar con la presentación de los resultados, se enumeran los parámetros que se han utilizado para éstos y las unidades en las que se presentan éstos.

Producción

Se define la producción como el número de unidades (latas de aerosol) producidas.

Tiempo de producción

Tiempo en el que la línea se encuentra en funcionamiento sin registrar parada, la línea puede estar en dos estados distintos:

- Producción de fórmula principal: se prepara una fórmula en el tanque principal. Se considera este tiempo productivo, aunque la línea de embotellado se encuentra parada a la espera de recibir producto para embotellar.
- Embotellado: la línea de embotellado se encuentra en funcionamiento y los tanques son vaciados paulatinamente alimentando a ésta.

La unidad de medida será minutos.

Tiempo de transición

Tiempo en que la línea se encuentra realizando una transición entre fórmulas. Se engloba dentro del tiempo de paradas no planificadas. Este tiempo se medirá en minutos.

Tiempo disponible

Es el tiempo planificado de trabajo de las líneas. Incluye tiempo de producción y el tiempo de paradas no planificadas. Teniendo en cuenta que la planta trabaja 3 turnos, 5 días a la semana, salvo paros de producción planificados el tiempo de apertura diario será de 1440 minutos para una línea y 2880 minutos para ambas líneas. Se medirá este parámetro minutos.

Productividad o Throughput

Se define como el número de unidades de producto terminado (en este caso latas de aerosol) producidas por hora de tiempo disponible. Nos da una idea de la capacidad de las líneas y de la planta y se utilizará para el cálculo de mejora. La unidad de medida será latas/hora.

Disponibilidad

Es el ratio entre el tiempo de producción y el tiempo disponible. Nos da la medida para evaluar cuánto tiempo empleamos en producir sobre el total del tiempo que tenemos disponible para tal efecto. Se trata de un porcentaje.

Resumen de parámetros definidos para realizar el análisis de resultados

Parámetro	Unidad
Producción	Unidades
Tiempo de producción	Minutos
Tiempo de transición	Minutos
Tiempo disponible	Minutos
Productividad	Latas/hora
Disponibilidad	%

Tabla 14: Resumen de parámetros utilizados en los cálculos del análisis de resultados

5.3. MÉTODO DE SIMULACIÓN

A continuación, se precisa el método seguido para simular: para cada orden de producción disponemos de las fórmulas producidas, la línea en la que fueron producidas (1 o 2) y el orden que siguió la secuencia. Se procederá a secuenciar una a una estas órdenes.

Recordemos que se ha creado para este proyecto un archivo Excel en el que, introduciendo las Fórmulas a secuenciar y el tamaño de lote, se generan las matrices de transiciones y tiempos de procesado que luego serán leídas por el programa informático.

Se introduce en el la lista del archivo Excel en primer lugar la última fórmula secuenciada de la anterior orden en la línea 1 y en segundo lugar la última fórmula secuenciada de la anterior orden en la línea 2. Recordemos que éstas serán nuestros primeros trabajos de la secuencia en las líneas 1 y 2 respectivamente debido a que tendremos una transición entre éstas y las fórmulas que secuenciamos a continuación. El programa las ordenará como primeras de la secuencia en cada línea de forma automática.

Número	Fecha	Fórmula	Tamaño de lote (kg)
1 ²	01/10/2020	1131	6000
2 ³	01/10/2020	1132	20000
3	02/10/2020	1128	20000
4	02/10/2020	1146	20000
5	02/10/2020	1144	6000
6	02/10/2020	1150	6000
7	02/10/2020	1139	6000
8	02/10/2020	1121	6000
9	02/10/2020	1146	6000
10	02/10/2020	1151	6000
11	02/10/2020	1136	6000
12	02/10/2020	1129	4000
13	02/10/2020	1125	4000

Tabla 15: Introducción de fórmulas a secuenciar en el archivo Excel

A continuación, se introducen las fórmulas de la orden actual en orden indistinto. Se generarán a partir de esta lista las matrices de transiciones y de tiempos de procesado. Una vez obtenidas estas matrices, se generarán por separado en sendos archivos de extensión *txt*. El programa leerá directamente estos archivos *txt*. Ejecutamos entonces el programa informático creado, que nos devolverá la secuencia óptima para cada máquina.

² Última fórmula secuenciada en la línea 1 el 01/10/2020

³ Última fórmula secuenciada en la línea 2 el 02/10/2020

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20
0	20	0	20	20	20	20	0	20	20	20
0	120	20	0	0	0	20	20	20	20	20
0	120	20	0	0	0	20	20	20	20	20
0	120	20	0	0	0	20	20	20	20	20
0	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20
0	20	0	20	20	20	20	0	20	20	20
0	120	20	120	120	120	20	20	0	20	20
0	20	20	20	20	20	20	20	20	0	20
0	20	20	20	20	20	20	20	120	20	0

Ilustración 18: Aspecto de la matriz de transiciones reducida en formato txt

```

0
66
140
140
140
66
66
140
140
57
66
    
```

Ilustración 19: Aspecto de la matriz de tiempos de procesado en formato txt

Se ha creado para el posterior análisis una base de datos en formato Excel. En esta base introduciremos los resultados de la secuenciación obtenidos del programa. Para cada orden simulada, se irá introduciendo en el archivo la secuencia obtenida. Al finalizar todas las simulaciones obtendremos como resultado la secuencia final de las fórmulas producidas en cada línea en el período de tiempo comprendido entre el 1 de octubre y el 30 de noviembre de 2020.

Cabe destacar pues, que existen dos diferencias entre la producción real y la producción simulada:

- Las fórmulas pueden ser procesadas en otra línea: una fórmula que en el caso real está procesada en la línea 1 podría ser procesada en la línea 2 en la simulación y viceversa.
- La secuencia de fórmulas de la simulación para cada línea será distinta de la real (también podría darse el caso de que coincidan si el caso real es óptimo). Esto es evidente pues es el objetivo de este trabajo el optimizar la secuencia.

Remarcar que, para el período de una orden, de máximo 27 horas, las fórmulas procesadas serán las mismas en ambos casos, para respetar la planificación real.

Línea	Número	Fecha	Fórmula	Tamaño de lote (kg)
1	1	01/10/2020	1131	6000
1	11	02/10/2020	1136	6000
1	8	02/10/2020	1121	6000
1	13	02/10/2020	1125	4000
1	5	02/10/2020	1144	6000
1	9	02/10/2020	1146	6000
1	4	02/10/2020	1146	20000
2	2	01/10/2020	1132	20000
2	12	02/10/2020	1129	4000
2	6	02/10/2020	1150	6000
2	10	02/10/2020	1151	6000
2	3	02/10/2020	1128	20000
2	7	02/10/2020	1139	6000

Tabla 16: Secuencia obtenida tras la ejecución del programa

Resumen de la simulación	
Lotes a secuenciar	386
Nº de días de producción	43
Unidades producidas	11.205.455
Nº de transiciones	355

Tabla 17: Resumen de la simulación

Asumiremos que los tiempos de paradas no planificadas, excepto las transiciones, sean los mismos para el caso simulado que para el caso real.

5.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez simulado el período de tiempo que comprende entre el 1 de octubre y el 30 de noviembre de 2020 se analizarán los resultados para evaluar el beneficio del uso de la herramienta de secuenciación creada. También se extrapolarán los datos al período de un año con el objetivo de tener una visión más amplia de los resultados.

En primer lugar, se compararán los resultados de la simulación con los datos reales de los que disponemos.

Comparación de resultados para el período octubre-noviembre		
	Real	Simulado
Nº transiciones verdes	305	334
Nº transiciones rojas	50	16
Tiempo disponible	123.840 min	120.340 min
Tiempo de producción	89.121 min	89.121 min
Tiempo de Transiciones	12.100 min	8.600 min
Disponibilidad	72%	74%
Tiempo de transiciones	10%	7%
Productividad	5.429 unidades/hora	5.590 unidades/hora

Tabla 18: Resumen de resultados de simulación para octubre y noviembre

Como se puede observar en la Tabla 18, utilizando la herramienta desarrollada en este proyecto, se reduce el número de transiciones rojas al mínimo durante este período. Las 16 transiciones rojas en la simulación se deben a la obligatoriedad por contrato de practicar al menos una a la semana en cada línea, por cuestiones de limpieza y desinfección.

También se puede observar una reducción en el tiempo disponible. Esto es debido a que al reducir el tiempo de transiciones es necesario menos tiempo para alcanzar el mismo volumen de producción.

Mejoras obtenidas en la simulación en el período octubre-noviembre	
Número reducido de transiciones rojas	34
Porcentaje de reducción de transiciones rojas	68%
Reducción del tiempo de transiciones	3.500 min
Reducción del tiempo de transiciones	29%
Mejora de la disponibilidad	2%
Mejora de la productividad	161 unidades/hora

Tabla 19: Mejoras obtenidas en la simulación de octubre a noviembre

En resumen, se consigue reducir durante este período en 34 el número de transiciones rojas, lo que supone una reducción de un 68%. Esto se traduce en un 29% menos de tiempo de transiciones o lo que es lo mismo, 3.500 minutos menos de paradas no planificadas.

En términos globales de las líneas, la mejora total de disponibilidad es de un 2%, por lo que seríamos capaces de producir 161 latas más por hora de disponibilidad.

Como se ha mencionado en la introducción, la planta se encuentra saturada, o lo que es lo mismo, no puede abastecer toda la demanda de aerosol que se necesita desde la empresa. Por lo tanto, podemos considerar que los 3.500 minutos de reducción de paradas pueden utilizarse para la fabricación de más producto.

Para evaluar la ganancia de producción se realizará un cálculo basándonos en este nuevo tiempo disponible y en la productividad obtenida en la simulación. De este modo, se multiplicará el tiempo disponible derivado de la reducción del tiempo de transiciones por la productividad, obteniendo la producción estimada para este período de tiempo. En la Tabla 20: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas se muestran los resultados de la estimación de ganancia de producción.

Ganancia de producción para el período octubre-noviembre	
Ganancia de tiempo disponible	3.500 min
Productividad	5.590 unidades/hora
Ganancia de tiempo de producción	2.593 min
Ganancia de producción	326.061 unidades

Tabla 20: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas octubre-noviembre

Para obtener una visión más amplia de la simulación, se transforman estos resultados en términos anuales, multiplicando los resultados por 6. A continuación se muestran los resultados de este cálculo.

Comparación de resultados anuales		
	Real	Simulado
Nº transiciones verdes	1.830	2.004
Nº transiciones rojas	300	96
Tiempo disponible	123.840 min	123.840 min
Tiempo de producción	534.726 min	534.726 min
Tiempo de Transiciones	72.600 min	51.600 min
Disponibilidad	72%	74%
Tiempo de transiciones	10%	7%
Productividad	5.429 unidades/hora	5.590 unidades/hora

Tabla 21: Resumen de resultados de simulación anuales

Mejoras obtenidas en la simulación anual	
Reducción de transiciones rojas	204
Reducción de transiciones rojas	68%
Reducción del tiempo de transiciones	21.000 min
Reducción del tiempo de transiciones	29%
Mejora de la disponibilidad	2%
Mejora de la productividad	161 unidades/hora

Tabla 22: Mejoras obtenidas en la simulación anual

Como es evidente, la mejora en disponibilidad, productividad y transiciones (%) es la misma, pues son ratios. En cuanto a la mejora en el tiempo de transiciones en minutos, en términos anuales se consiguen ahorrar 21.000 min, o lo que es lo mismo, 350 horas de producción. Este ahorro procede de la reducción en 204 del número de transiciones rojas, pasando de 300 a 96, que es el mínimo número que podemos realizar (una por semana y por línea).

Ganancia de producción anual	
Ganancia de tiempo disponible	21.000 min
Productividad	5.590 unidades/hora
Ganancia de tiempo de producción	15.559 min
Ganancia de producción	1.956.368 unidades

Tabla 23: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas anual

En términos anuales, la reducción del número de transiciones rojas se traduce en un aumento de la producción en aproximadamente 1.956.368 unidades, lo que equivale a 7,3 días de producción o aproximadamente una semana y media, ya que los fines de semana no hay producción.

5.5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado realizaremos, a partir de los resultados de la simulación, un análisis para evaluar el impacto económico de la aplicación de este proyecto.

Para el análisis, se tendrán en cuenta dos factores principales:

- El ahorro derivado de la eliminación de transiciones rojas, pues su coste es mayor que el de las transiciones verdes.
- El aumento de los beneficios correspondientes a una mayor producción, pues las líneas se encuentran saturadas (la demanda supera a la producción).

5.5.1. Ahorro derivado de la reducción del número de transiciones rojas

En primer lugar, realizaremos el análisis del ahorro derivado de la reducción del número de transiciones rojas. Como se menciona en el apartado 2.6.4., al realizar una transición roja es preciso llevar a cabo una limpieza y desinfección. Esta limpieza y desinfección utiliza una mezcla de Etanol de 500kg al 70%. Conocemos el coste por kilogramo de Etanol, que es de 1,07€/kg, lo que supone un coste por cada transición roja de 374,5€. El precio del Etanol es tomado el 1 de octubre de 2020. Para los cálculos utilizaremos este valor para los períodos de tiempos evaluados, si bien en la realidad este precio fluctúa en el tiempo, ya que no hay un contrato a largo plazo con el proveedor, sino que se negocia el precio por pedido. Al eliminar o cambiar estas transiciones rojas por verdes, eliminamos su coste asociado.

Otro ahorro asociado a la reducción de transiciones rojas es la gestión del residuo derivado de la limpieza y desinfección, que debe ser almacenado y enviado a una planta de tratamiento de residuos. Desafortunadamente, no se han podido obtener datos del coste de esta operación.

Ahorro económico de la eliminación de transiciones rojas para octubre-noviembre	
Cantidad Etanol por transición roja	350 kg
Precio Etanol	1,07 €/kg
Nº de transiciones rojas eliminadas	34
Ahorro económico	12.733 €

Tabla 24: Ahorro económico de la reducción del número de transiciones rojas para el período octubre-noviembre

Como se muestra en la Tabla 24, para los dos meses analizados, se obtiene un ahorro económico directo de 11.900€, lo que supone un ahorro mensual de 5.950€.

Si extrapolamos estos datos a un período de un año, el ahorro obtenido es de 71.400€.

Ahorro económico de la eliminación de transiciones rojas anual	
Cantidad Etanol por transición roja	350 kg
Precio Etanol	1,07 €/kg
Nº de transiciones rojas eliminadas	204
Ahorro económico	76.398 €

Tabla 25: Ahorro económico de la reducción del número de transiciones rojas anual

Remarcar que no se tiene en cuenta el ahorro económico que pudiera existir por el desecho de fórmula que existe en una transición. Primeramente, la cantidad de desecho es la misma en una transición verde y una roja. Segundo, al utilizar el sistema de Pigs, el desecho se reduce a tan solo 10,8kg. Aunque haya una reducción del número total de transiciones (en la simulación 30 transiciones menos anuales), esto supondría tan sólo 324kg anuales, por lo que podemos despreciar su coste.

5.5.2. Beneficio derivado del aumento de la capacidad de producción

Además del ahorro reportado por la reducción del número de transiciones rojas, éste tiene como consecuencia una reducción del número de horas dedicadas a transiciones, que pueden ser dedicadas a producción.

Como es mencionado anteriormente, las líneas se encuentran saturadas, es decir, existe más demanda de la que puede ser absorbida por la planta actualmente. Es por esto que todo el tiempo ganado de la aplicación de la herramienta desarrollada se dedicará a producción.

En la Tabla 20: Ganancia de producción derivada de la reducción de transiciones rojas octubre-noviembre se reporta a partir de la simulación que, usando la herramienta desarrollada en este

proyecto se puede reducir el tiempo dedicado a transiciones en 3.500 minutos, que se pueden dedicar a producción. Considerando una productividad de 5.590 unidades/hora, esto supone para estos dos meses una producción de 326.061 latas de aerosol.

Por motivos de confidencialidad, no disponemos del beneficio que obtiene la empresa por cada unidad de producto terminado. Conocemos que el precio de venta del producto es de 2,6€ por unidad. Realizaremos una estimación suponiendo que el beneficio es del 10% del precio de venta final. Estimaremos así el beneficio derivado del aumento de producción.

Beneficio derivado del aumento de capacidad para octubre-noviembre	
Ganancia de producción	326.061 unidades
Precio medio de venta	2,6 €/unidad
Ventas	847.760 €
Beneficio neto por unidad	0,26 €/unidad
Beneficio neto	84.776 €

Tabla 26: Beneficio derivado del aumento de capacidad para el período octubre-noviembre

Para los dos meses de los que se dispone de datos de 2020, se obtendría un beneficio estimado derivado de la mayor capacidad de producción de 84.776€.

Beneficio derivado del aumento de capacidad anual	
Ganancia de producción	1.956.368 unidades
Precio medio de venta	2,6 €/unidad
Ventas	5.086.557 €
Beneficio neto por unidad	0,26 €/unidad
Beneficio neto	508.656 €

Tabla 27: Beneficio derivado del aumento de la capacidad anual

En términos anuales, el beneficio sería de 508.656€. Se puede observar pues, que el beneficio derivado de un aumento de la productividad es 6 veces superior al beneficio obtenido del ahorro directo de la eliminación de una transición roja.

5.5.3. Beneficio total

Una vez analizados por separado los dos factores principales de beneficio de la herramienta desarrollada en este proyecto, se analizarán en conjunto para evaluar el impacto total.

Beneficio total para octubre-noviembre	
Reducción de transiciones rojas	34
Mejora de la disponibilidad	2%
Ganancia de producción	326.061 unidades
Ahorro de la limpieza y desinfección	12.733 €
Beneficio por aumento de producción	84.776 €
Beneficio total	97.509 €

Tabla 28: Beneficio total para el período octubre-noviembre

Para octubre y noviembre, sumando los dos factores calculados, obtenemos un beneficio de 97.509€, que mensualmente supondría 48.754€.

Beneficio total anual	
Reducción de transiciones rojas	204
Mejora de la disponibilidad	2%
Ganancia de producción	1.956.368 unidades
Ahorro de la limpieza y desinfección	76.398 €
Beneficio por aumento de producción	508.656 €
Beneficio total	585.054 €

Tabla 29: Beneficio total anual

Anualmente, el beneficio total sería de 585.054€. Además del beneficio económico que viene ligado a esta mejora, se mejora la disponibilidad de las líneas en un 2%, lo que supone para la planta 57 minutos diarios, casi una hora, de tiempo disponible para producción o en su defecto, para otras tareas de valor como mantenimientos preventivos o limpieza.

En el caso de no saturación, se reduciría también el tiempo de operarios necesario para un mismo volumen de producción, abaratando los costes de producción de estos aerosoles y permitiendo el empleo de estos operarios en otras tareas productivas.

5.6. ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Hemos analizado los resultados de la herramienta desarrollada para el problema que se plantea para este proyecto. Sin embargo, ésta puede aplicarse a problemas similares en otros contextos. El objetivo de este apartado es analizar la capacidad que tiene la herramienta, es decir, qué

número de trabajos máximo es capaz de secuenciar y cuál es el tiempo de procesamiento para este número de trabajos.

Con este objetivo, se realizarán diferentes simulaciones con número de trabajos creciente y se medirá el tiempo de procesamiento para cada uno de ellos. El número de máquinas será constante e igual a dos máquinas.

Para medir el tiempo de procesamiento de la herramienta se añade el módulo "time" de Python.

```
685 print("Tiempo de procesado de la herramienta")
686 print("--- %s seconds ---" % (time.time() - start_time))
```

Ilustración 20: Código para medir el tiempo de procesado de la herramienta informática

5.6.1. Análisis utilizando Gurobi

Empezaremos simulando utilizando el "solver" Gurobi, el punto de partida serán 5 trabajos y a continuación iremos avanzando de 5 en 5 hasta para encontrar el límite de trabajos que podemos simular con la versión para estudiantes de Gurobi.

Primeramente, se concluye que se pueden realizar simulaciones para hasta 54 trabajos con esta versión. Con la versión gratuita sin licencia para estudiantes solo se puede resolver hasta 30 trabajos, cuando se excede el límite de tamaño de la versión.

Hay que remarcar que el tiempo de procesamiento también depende de la capacidad del ordenador, así como de la ocupación de su memoria. Por ello, en algunas simulaciones se registraron tiempos de procesamiento elevados con respecto a otras simulaciones con un número parecido de trabajos.

Para el rango de número de trabajos que se plantean en este proyecto (hasta 13 trabajos) los tiempos de procesamiento se encuentran por debajo de 1 segundo. El tiempo de procesamiento para rangos de hasta 54 trabajos es de hasta 25 minutos en el peor de los casos, teniendo un tiempo medio de 3 minutos.

Simulación de capacidad para 2 máquinas en función del número de trabajos con Gurobi

Simulación	Nº de trabajos	Tiempo de procesado (s)
1	5	0,070043087
2	10	0,397864819
3	15	0,773911476
4	20	1,790328264
5	25	9,145540237
6	26	4,199798822
7	28	6,83823514
8	30	4,660058737
9	32	9,718766212
10	34	7,634653568
11	36	12,51615453
12	38	478,8295012
13	40	27,69728756
14	42	1495,304417
15	44	227,7509141
16	46	118,8308353
17	48	111,37534
18	50	800,2733738
19	52	113,0092361
20	54	115,5736125

Tabla 30: Simulación de capacidad para 2 máquinas en función del número de trabajos con Gurobi

En la Ilustración 21 se muestran los tiempos de procesamiento en función del número de trabajos.

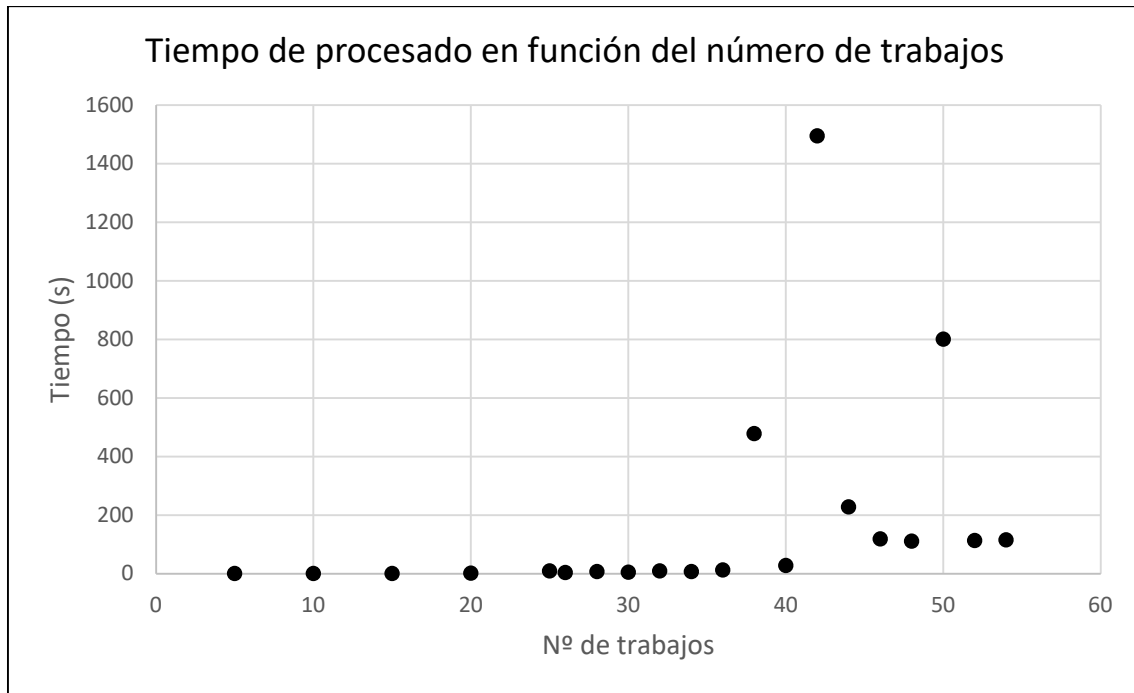


Ilustración 21: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con Gurobi

5.6.2. Análisis utilizando GLPK

Ya que con Gurobi nos vemos limitados en el tamaño del problema, se realizará otra prueba de capacidad con otro “solver”, esta vez de código abierto. Para esta prueba se ha elegido GLPK.

Para realizar esta prueba, al igual que con Gurobi, se propuso que el punto de partida sean 5 trabajos y a continuación ir avanzando de 5 en 5. Sin embargo, se detectó que GLPK requiere más tiempo de procesamiento que Gurobi, por lo que se realizará la prueba empezando por 2 trabajos y avanzando de 2 en 2 trabajos.

De los resultados de las pruebas utilizando GLPK se puede deducir claramente que la capacidad de éste es menor que la de Gurobi, ya que para un menor número de trabajos (12 con GLPK frente a 20 con Gurobi) el tiempo de procesamiento es mayor (7,39 segundos frente a 1,79 segundos).

Simulación de capacidad para 2 máquinas en función del número de trabajos con GLPK

Simulación	Nº de trabajos	Tiempo de procesado (s)
1	2	0,4007
2	4	0,5217
3	6	0,5138
4	8	0,7268
5	10	1,5191
6	12	7,3948

Ilustración 22: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con GLPK

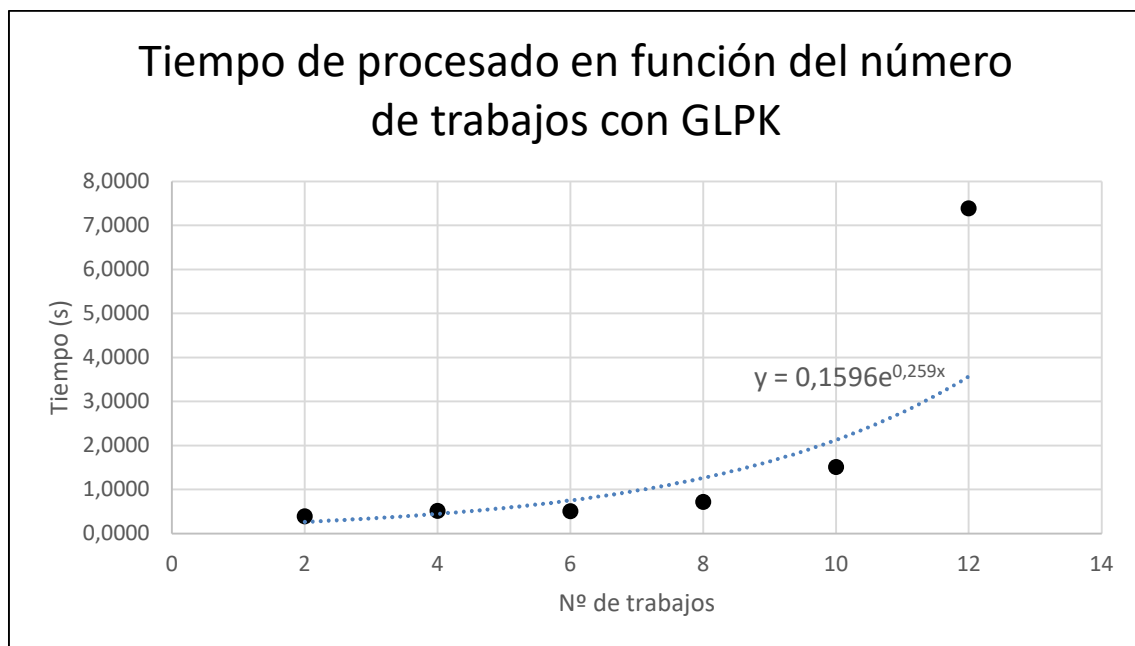


Ilustración 23: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con GLPK

Como podemos observar en la Ilustración 23: Tiempo de procesamiento en función del número de trabajos a secuenciar con GLPK, con hasta 10 trabajos a secuenciar, el comportamiento del tiempo de procesamiento sigue una tendencia aproximadamente exponencial. A partir de ese punto crece con mayor velocidad que la exponencial.

A partir de 14 trabajos el tiempo de procesamiento crece hasta superar las horas, por lo que se vuelve demasiado grande para resultar útil.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIONES

En este proyecto se han marcado como objetivos primero, desarrollar una herramienta para dar solución al problema real detectado de encontrar una secuenciación de la producción óptima y segundo reducir el número de transiciones rojas mediante esta secuenciación.

El problema viene dado por la transición o cambio entre las distintas fórmulas producidas, existiendo dos, una transición roja y una verde y siendo la roja más larga y costosa.

En conclusión, se han cumplido los objetivos propuestos para este proyecto. El primero de ellos, generar un método de secuenciación de la producción se ha conseguido mediante el desarrollo de una herramienta informática que obtiene secuencias óptimas para la producción de aerosoles de la empresa.

Para ello se ha buscado primeramente modelizar matemáticamente el problema como un problema de optimización lineal del viajante múltiple, con dos máquinas en paralelo idénticas que pueden procesar todos los trabajos.

Una vez se modelizó el problema, se desarrolló la herramienta para secuenciar la producción. Para ello se dispuso crear un programa en el lenguaje de programación Python utilizando la biblioteca Pyomo para representar el modelo de optimización lineal y resolverlo mediante un “solver”, en este caso Gurobi. Este programa nos devolverá como resultado la secuencia óptima de producción.

El segundo objetivo, reducir el número de transiciones rojas mediante la secuenciación, también se ha probado. Se dispone de datos de producción real para un período de dos meses. Con el programa creado, se dispuso a simular la producción de este período y comparar el resultado de la secuenciación con la secuencia real de producción, con el objetivo de evaluar su impacto.

El resultado de este análisis es la reducción del número de transiciones rojas en 34, mejorando la disponibilidad de las líneas en un 2%, lo que supone 58 horas de ahorro de tiempo. En términos económicos, la reducción de 34 transiciones rojas supone un ahorro de 12.733€ en materia prima para limpieza y desinfección y un potencial aumento de las ventas en 847.760€, debido a que la planta se encuentra actualmente saturada.

Llevando los cálculos a términos anuales, se reduce el número de transiciones rojas en 204, lo que supone un ahorro de 76.398€ y unas ventas de 5.086.557€. Se estima un ahorro total anual de 585.054€.

Así mismo, se ha evaluado la capacidad de la herramienta desarrollada para resolver problemas de mayor tamaño con un solver de pago (Gurobi) y con un solver de código abierto (GLPK). Se ha demostrado que utilizando Gurobi se consiguen resultados óptimos en un tiempo inferior a

10 segundos para un número de trabajos mayor que GLPK. Con Gurobi obtenemos resultados para hasta 54 trabajos.

Aunque el tamaño de la instancia resuelta para la empresa era lo suficientemente pequeño para que el modelo de programación lineal entera mixta lo pudiera resolver en pocos segundos, es de esperar que un aumento significativo del número de trabajos a secuenciar se traduzca en instancias para las que el modelo matemático necesitará mucho tiempo de cómputo, o incluso serán intratables. Por lo tanto, en líneas futuras se buscará resolver este problema con técnicas exactas más eficientes que el modelo matemático, y si aun así estas técnicas no tienen la suficiente eficiencia, se buscarán algoritmos heurísticos y/o metaheurísticos.

6.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

A partir de este punto, existen varias líneas de trabajo futuras en el marco de este proyecto. En primer lugar, utilizar la herramienta en la producción real de la planta durante un período de tiempo para evaluar su impacto real.

En segundo lugar, con el objetivo de ampliar el espectro de utilización de la herramienta, una línea de trabajo es modificar el programa de modo que podamos no solo elegir el número de trabajos a secuenciar si no también el número de máquinas. En la herramienta desarrollada, sólo se puede secuenciar para dos máquinas, teniendo la opción de secuenciar para una sola máquina utilizando el modelo monomáquina. El modelo matemático contempla la posibilidad de secuenciar para n máquinas, el objetivo sería pues modificar el código para disponer de esta posibilidad. Ello haría posible la aplicación en otros casos de la herramienta, haciéndola más flexible.

Otra posible vía de trabajo es la reducción del tiempo de procesamiento del programa. Para hasta 54 trabajos obtenemos tiempos de procesado dentro del rango que exige el proyecto (como se menciona en el apartado 2.5 proceso de planificación de las órdenes de producción, disponemos de 2 horas entre la recepción de la orden y el envío de la confirmación). Para un mayor número de trabajos los tiempos de procesamiento del programa se vuelven demasiado grandes. Esto podría verse aumentado si crece también el número de máquinas a secuenciar. Por ello, para la aplicación de la herramienta en problemas de mayor envergadura, se debe trabajar en la optimización del código con el fin de reducir el tiempo de computación.

Por último, trabajar la gestión visual de la herramienta. Tal y como ha sido desarrollada, ésta se ejecuta directamente desde un entorno de desarrollo para Python. Esto la hace menos comprensible para usuarios sin conocimiento en Python o entornos de desarrollo. Para transformarla en una herramienta más accesible para el usuario, se debe crear un entorno visual para su utilización que sea intuitivo y simple de utilizar, y que devuelva los resultados en un formato adecuado para el usuario.

BIBLIOGRAFÍA

- Avalos-Rosales, O., Angel-Bello, F., & Alvarez, A. (2015). Efficient metaheuristic algorithm and re-formulations for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence and machine-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12), 1705–1718.
- COIN-OR Foundation. (2016). *COIN-OR*. Recuperado el 15 de 8 de 2021, de <https://projects.coin-or.org/Cbc>
- Fanjul-Peyro, L., Ruiz, R., & Perea, F. (2018). Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times. *Computers and Operations Research*, 101, 173–182.
- Gurobi Optimization, LLC. (2021). *Gurobi*. Recuperado el 15 de 8 de 2021, de <https://www.gurobi.com/>
- Kara, I., & Bektas, T. (2006). Integer linear programming formulations of multiple salesman problems and its variations. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1449–1458.
- Makhorin, A. (2012). *GLPK (GNU Linear Programming Kit)*. Obtenido de <https://www.gnu.org/software/glpk/>
- Miller, C., Tucker, A., & Zemlin, R. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326–329.
- Python Software Foundation. (2021). *Python*. Recuperado el 29 de 8 de 2021, de <https://www.python.org/>
- Sandia National Laboratories. (2017). *pyomo.readthedocs.io*. Recuperado el 15 de 8 de 2021, de https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/pyomo_overview/simple_examples.html
- Spyder Website, C. o. (2020). *Spyder*. Recuperado el 29 de 8 de 2021, de <https://www.spyder-ide.org/>
- Wikipedia, C. d. (2019). *GNU Linear Programming Kit*. Recuperado el 15 de 8 de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/GNU_Linear_Programming_Kit
- Wikipedia, C. d. (2021). *Proyecto GNU*. Recuperado el 15 de 8 de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_GNU
- William E. Hart, Carl D. Laird, Jean-Paul Watson, David L. Woodruff, Gabriel A. Hackebeil, Bethany L. Nicholson y John D. Sirola (2017). *Pyomo – Optimization Modeling in Python* (Segunda Edición ed.). Springer. Recuperado el 2021

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

1. ESTUDIO PREVIO

Nº	Unidad	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Importe
1.1	h	50	Ingeniero Industrial en formación	11 €	550 €
1.2.	h	5	Ingeniero Químico	21 €	105 €
				TOTAL	655

2. DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO Y ALGORITMOS

Nº	Unidad	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Importe
2.1	uds	1	Ordenador Lenovo Thinkpad T440s	460 €	460 €
2.2	uds	1	Microsoft Office 2019	18,90 €	18,90 €
2.3	uds	1	Gurobi Optimizer	10.000 €	10.000 €
2.4	h	258	Ingeniero Industrial en formación	11 €	2.838 €
2.5	h	6	Asistencia de Tutores	21 €	126 €
				TOTAL	13.443 €

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Nº	Unidad	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Importe
3.1	h	40	Ingeniero Industrial en formación	11 €	440 €
1.2.	h	1	Asistencia de Tutores	21 €	21 €
				TOTAL	461 €

4. TOTAL

Partida	Importe
Estudio previo	655 €
Desarrollo del modelo matemático y algoritmos	13.443 €
Análisis y resultados	461 €
TOTAL	14.559 €

DOCUMENTO 3: ANEXOS

Esta sección contiene los diferentes anexos del trabajo. Dada su extensión, se adjuntan en formato electrónico.

ANEXO 1: MATRIZ DE TRANSICIONES

<https://drive.google.com/drive/folders/1b98valH8-1A6Vq3jh6zFsvy1STa-Cvzm?usp=sharing>

ANEXO 2: CÓDIGO DEL PROGRAMA

https://drive.google.com/drive/folders/1la3RnrE8DmkAS0_b_AfiuUiUPHHZ9vc3?usp=sharing