COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA EN UNA PANIFICADORA CON MÚLTIPLES UNIDADES DE FLUJO

Autor: Antonio Rébola Iranzo

Director: Antonio García de Garmendia

Madrid

Agosto de 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

‘Optimización de cuellos de botella en una panificadora con múltiples unidades de flujo’

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Antonio Rébola Iranzo Fecha: 11/ 08/ 24

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Dr. Antonio García de Garmendia Fecha: 12 Agosto, 2024

COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA EN UNA PANIFICADORA CON MÚLTIPLES UNIDADES DE FLUJO

Autor: Antonio Rébola Iranzo

Director: Antonio García de Garmendia

Madrid

Agosto de 2024

Agradecimientos

Al equipo de Novapan, especialmente a Xabier Balda y Javier Viñal, por su colaboración y disponibilidad.

A D. Antonio García de Garmendia, director de este proyecto, por su implicación y empeño.

Y a mi familia, por su confianza en mí e incondicional respaldo.

OPTIMIZACIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA EN UNA PANIFICADORA CON MÚLTIPLES UNIDADES DE FLUJO

Autor: Rébola Iranzo, Antonio.
Director: García de Garmendia, Antonio.
Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se estudia la optimización de una planta panificadora. Para ello, se modela como un conjunto de tareas, operaciones y máquinas según la metodología del Taller de Trabajo (*Job Shop Scheduling*). La optimización se logra a través de un algoritmo heurístico. Éste asigna las tareas basándose en hipótesis específicas a la planta a optimizar y a las características de sus productos y procesos. Se incorporan conceptos de cuellos de botella y Lean Management. La evaluación económica del proyecto arroja una alta rentabilidad; la reducción del tiempo de ejecución de los procesos (*makespan*) resulta en ahorros muy superiores a la reducida inversión necesaria.

Palabras clave: planificación, heurística, cuello de botella, pan

1. Introducción

La producción de pan es un proceso minucioso, que requiere de procesos, temperaturas, y tiempos muy precisos[1]. En la planta panificadora de Novapan SL se fabrica una gran variedad de panes, tanto para empresas del Grupo como para terceros. Así, cada semana es necesario afrontar el reto de planificar toda la planificación semanal. Actualmente no se dispone de un método de asignación automática de tareas, por lo que se realiza manualmente, con la ayuda de históricos y del conocimiento de sus trabajadores.

Para su proceso de producción, la planta cuenta con 22 máquinas. Según su función, han sido agrupadas siguiendo un código de colores en la Figura 1: amasado (azul oscuro), formado y entablado (verde), fermentado (fucsia), horneado (naranja), reposado (amarillo), túnel de enfriamiento (azul claro) y empaquetado (morado).

Las más de 50 referencias del catálogo de la fábrica, que cambian constantemente, pueden tener itinerarios muy distintos, aunque generalmente todos siguen las etapas señaladas anteriormente.

El túnel de enfriamiento supone la unión de todos los flujos de productos, lo que sumado a su limitada capacidad y largos tiempo de proceso, hacen de él el cuello de botella del sistema. En caso de saturarse, limita la producción del resto de máquinas. Adicionalmente, los estándares de calidad del pan no permiten paradas entre procesos de un producto, por lo que no es aceptable que el producto espere en amortiguadores.

[1] Troadec *et al.*, (2023)

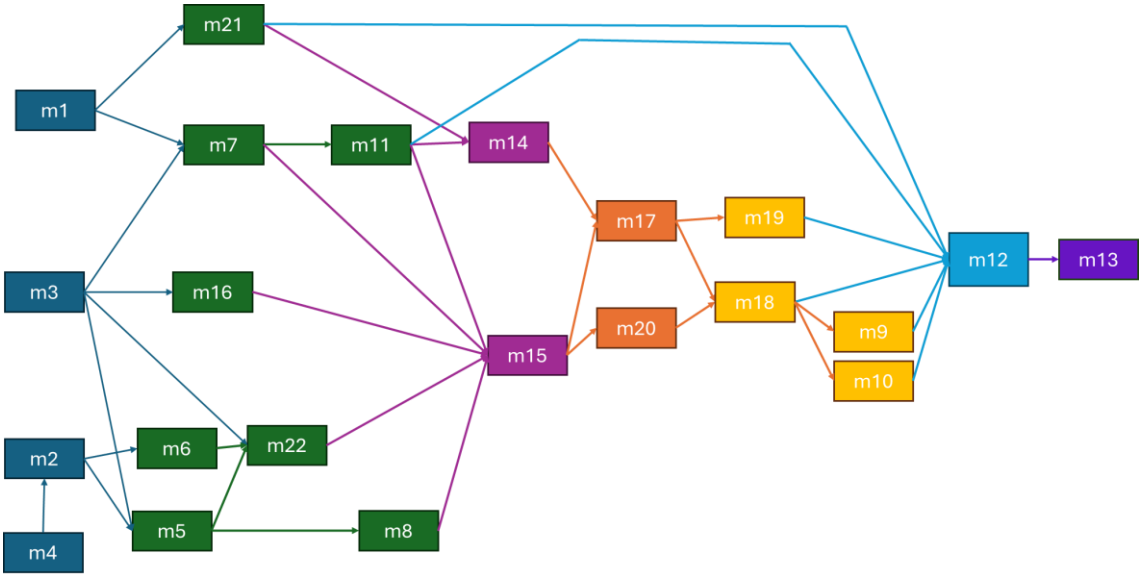

Figura 1 – Diagrama de flujo de procesos. Fuente: Elaboración propia (2024)

2. Definición del proyecto y metodología

Para optimizar la producción de la planta y aumentar su rentabilidad, se ha definido como función objetivo —a minimizar— el tiempo que se tarda en procesar todo el pedido. Eso es, desde el arranque de la primera operación necesaria hasta el acabado de la última.

Se han de modelar todas las restricciones presentes del caso. Para ello, tras una exhaustiva la revisión de la literatura, se determinó el modelo del Taller de Trabajo como el más adecuado para reflejar las particularidades de la fábrica. Se decidió del mismo modo optar por el diseño un algoritmo propio para optimizar la asignación de tareas. La lógica heurística empleada para ello está estrechamente basada en el conocimiento integral de la planta y su funcionamiento.

Para posibilitar el asignado de tareas, fue necesario adaptar la realidad de la planta al modelo matemático. La fabricación de pan es un proceso notablemente distinto a los grandes referentes académicos, lo cual se ve reflejado en el modo en que las máquinas procesan las operaciones. Bajo la óptica del Taller de Trabajo, las tareas a cumplir están conformadas por operaciones, y las máquinas son las encargadas de ejecutar dichas operaciones. El Taller de Trabajo asume que una máquina no puede realizar más de una operación simultáneamente, y los estudios que se centran en ampliar el horizonte de la ejecución de tareas simultáneas, lo hacen a través de lotes. Sin embargo, los equipos que trabajan en formado, fermentado o enfriado no solo procesan simultáneamente varias operaciones; éstas comienzan y terminan en tiempos diferentes, entrando y saliendo de las máquinas según sus tiempos de proceso requieran. Ante la falta de referencias académicas, se optó por un modelo equivalente: por cada máquina capacidad n, se han dispuesto n máquinas con capacidad unitaria. Así, el modelo permite la entrada y salida de operaciones durante el tiempo requerido por cada una, sin sobrepasar la capacidad máxima de la máquina original.

Adicionalmente, el tratado de operaciones deberá tener en cuenta los cambios de unidades a lo largo de la producción, debido a la inviabilidad de trabajar en piezas de

pan: las tareas comienzan siendo UFAs (unidades de fabricación), para posteriormente transformarse en carros. El número de carros que equivalen a una UFA depende de la referencia a la que corresponda la tarea en cuestión.

Al diseñar el algoritmo heurístico, se buscó explotar las diferencias entre dos grandes grupos de productos: Moitec y Artesana. Los primeros conforman la mayor parte del volumen de producción, y tienen procesos y tiempos relativamente homogéneos. Los productos de Artesana presentan una mayor variabilidad en tiempos y máquinas requeridas. Con esto en mente, junto con el conocimiento del cuello de botella del sistema, se elaboró la siguiente estrategia de optimización:

1. Separar las tareas demandadas en (i) Moitec o (ii) Artesana:

$$D_M = \{i \in D \mid i\ pertenece\ a\ Moitec\} \quad \text{[Ec. 1]}$$

$$D_A = \{i \in D \mid i\ pertenece\ a\ Artesana\} \quad \text{[Ec. 2]}$$

$$D_M \cap D_A = \emptyset,\ D_M \cup D_A = D$$

2. Maximizar la ocupación del cuello de botella con tareas de Moitec (m12):

$$\max\left(\frac{\sum_{i \in D_M} t_{proceso}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Ec. 3]}$$

$t_{proceso}(i, m12)$ →tiempo que pasa la tarea i en el túnel (m12).

T_{total}→ duración total de la producción semanal.

C_{12}→ capacidad del túnel de enfriamiento rápido.

3. Ocupar los huecos restantes con tareas de Artesana:

$$\max\left(\frac{\sum_{i \in D_A} t_{proceso}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Ec. 4]}$$

Para mejorar la efectividad del algoritmo al asignar tareas en la planificación, se expusieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis I: Saturar el túnel de enfriamiento primero con productos del grupo Moitec, y posteriormente de Artesana, reduce el tiempo total de proceso.

Hipótesis II: Al saturar el túnel con Moitec, dejar *z* huecos libres reduce el tiempo total de proceso.

Hipótesis III: Al saturar el túnel con Moitec, iterar con incrementos de tiempo *t* menores reduce el tiempo total de proceso.

Hipótesis IV: Empezar la jornada con los productos que tardan menos —por tiempos de proceso— en llegar al cuello de botella reduce el tiempo total de proceso.

Hipótesis V: Introducir aleatoriedad en el orden en el que se itera sobre las tareas puede otorgar mejoras significativas respecto a un algoritmo determinista.

3. Resultados y conclusiones

Tras comprobar las hipótesis mediante simulaciones, se concluyó la validez de las hipótesis I, III y V, quedando el modelo final del algoritmo tal y como refleja la Tabla 1:

Asignar en dos fases	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No
Incrementos de tiempo *t*	0,5
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0
Orden de tareas aleatorio	Sí

Tabla 1 – Modelo del algoritmo con las especificaciones finales. Fuente: Elaboración propia (2024)

Tras 15 ejecuciones del algoritmo —necesarias debido a la variabilidad introducida por la quinta hipótesis—, la mejor planificación alcanzada logró una reducción de la función objetivo de 1144,2 minutos, alrededor de 19 horas.

Cerrar antes cada semana permite ahorrar, combinando sueldos y el gasto energético de determinadas máquinas, un total de 3.857,62€ semanales. En cambio, el coste de mantener la mejora operativa es de 42.45€. El coste más significativo es por ende la inversión inicial, alcanzando 7.270,10€. Todo ello se desglosa a continuación en la Tabla 2.

AHORRO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Mano de Obra	2.699,83 €	semanal	2.699,83 €
Energía	1.157,79 €	semanal	1.157,79 €
		TOTAL SEMANAL	**3.857,62 €**
GASTO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Implementación	7.260,00 €	única	-
Licencias	11,70 €	anual	0,23 €
Mantenimiento	42,22 €	semanal	42,22 €
Amortización del equipo	3,37 €	semanal*	-
		TOTAL SEMANAL	**42,45 €**
		TOTAL INICIAL	**7.270,10 €**

*: Durante 3 semanas, previas a la puesta en marcha de la planificación

Tabla 2 - Ahorros y gastos derivados de la implementación. Fuente: Elaboración propia (2024)

La gran diferencia entre ahorros y gastos semanales facilitan enormemente la recuperación de la inversión, que se alcanza antes de terminar la segunda semana. El punto muerto de la inversión es ilustrado en la Figura 2.

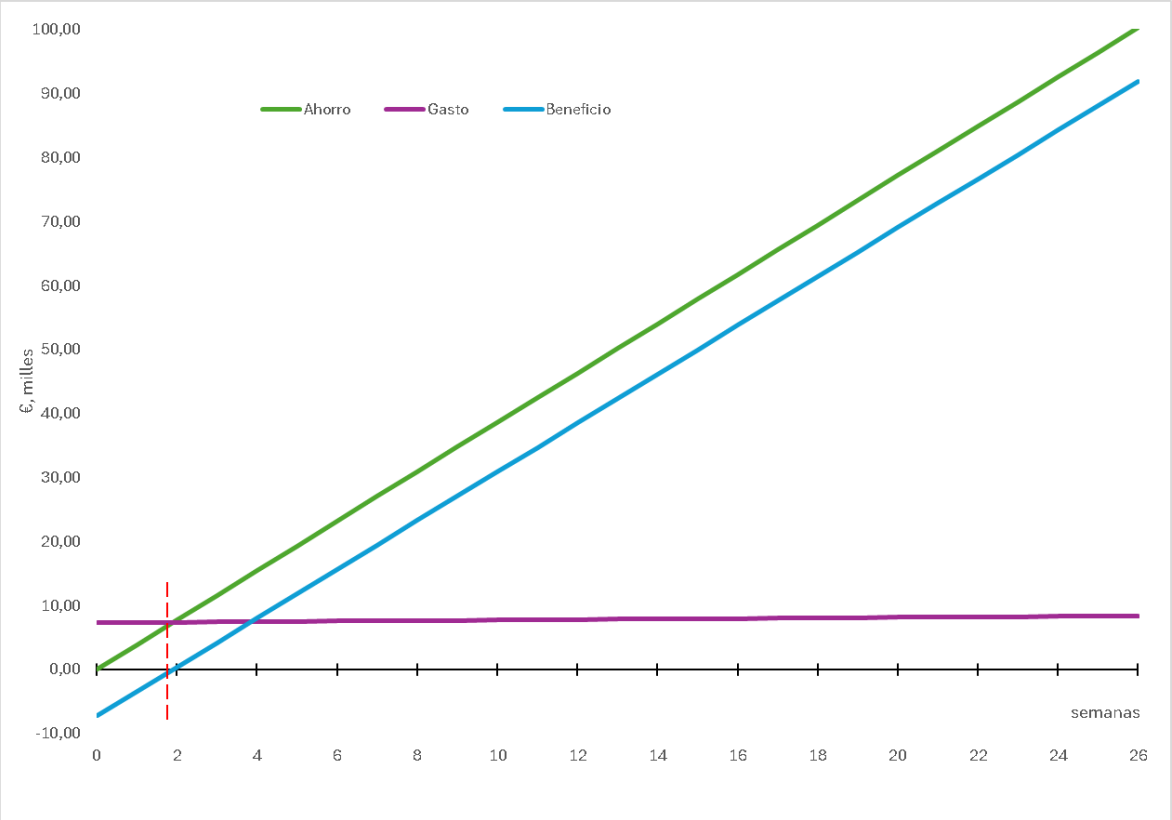

Figura 2 – Gráfico de punto muerto de la inversión. Fuente: Elaboración propia (2024)s

Con la inversión inicial ya superada, cada semana se suman 3.815,17€ al beneficio, que acumulado durante medio año (26 semanas) alcanza la cifra de 91.924,45€. El segundo gran atractivo del proyecto es su facilidad de implantación. Sin nueva maquinaria ni formación necesaria, se asegura una transición fluida y sin interrupciones.

4. Referencias

Troadec, R.; Regnault, S.; Nestora, S.; Jacolot, P.; Niquet-Léridon, C.; Anton, P.M.; Jouquand, C. (2023). Effect of fermentation conditions of bread dough on the sensory and nutritional properties of French bread, Springer International Publishing

BOTTLENECK OPTIMIATION IN A BREAD PRODUCTION PLANT WITH MULTIPLE FLOW UNITS

Author: Rébola Iranzo, Antonio.
Supervisor: García de Garmendia, Antonio.
Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project focuses on the optimization of a bread production plant. Said plant is modeled as a set of jobs, operations and machines according to the Job Shop Scheduling methodology. Optimization is achieved through a heuristic algorithm. This algorithm assigns jobs based on specific assumptions about the plant, and the characteristics of its products and processes. Concepts about bottlenecks and Lean Management are incorporated into the job assignment logic. The economic evaluation of the project demonstrates high profitability; the reduction in makespan leads to significant savings, exceeding the modest required investment.

Keywords: scheduling, heuristics, bottleneck, bread

1. Introduction

Bread production is a meticulous process, requiring a high degree of precision regarding processes, temperatures and timing[1]. At Novapan SL.'s plant, a wide variety of products are manufactured, both for other companies withing the Group and for third parties. Each week, the challenge of scheduling the whole production must be addressed. Currently, there is no automatic job assigning method available, so it is performed manually, relying on historical data and the expertise of workers.

The production process involves 22 different machines, which have been grouped according to their function and represented by color codes in Figure 1: kneading (dark blue), shaping and moving into trolleys (green), fermenting (pink), baking (orange), resting (yellow), cooling tunnel (light blue), and packaging (purple). The factory's catalogue includes more than 50 product references, which vary on the weekly basis and follow different production routes. However, they generally all go through the stages mentioned above.

The cooling tunnel is the convergence point of all product flows. Due to its limited capacity and long processing times, it acts as the bottleneck in the system. When overloaded, it restricts the output capacity of the other machines. Additionally, quality standards do not allow for pauses between processes within a job, meaning it is unacceptable for the product to sit in intermediate buffers.

.

[1] Troadec *et al.*, (2023)

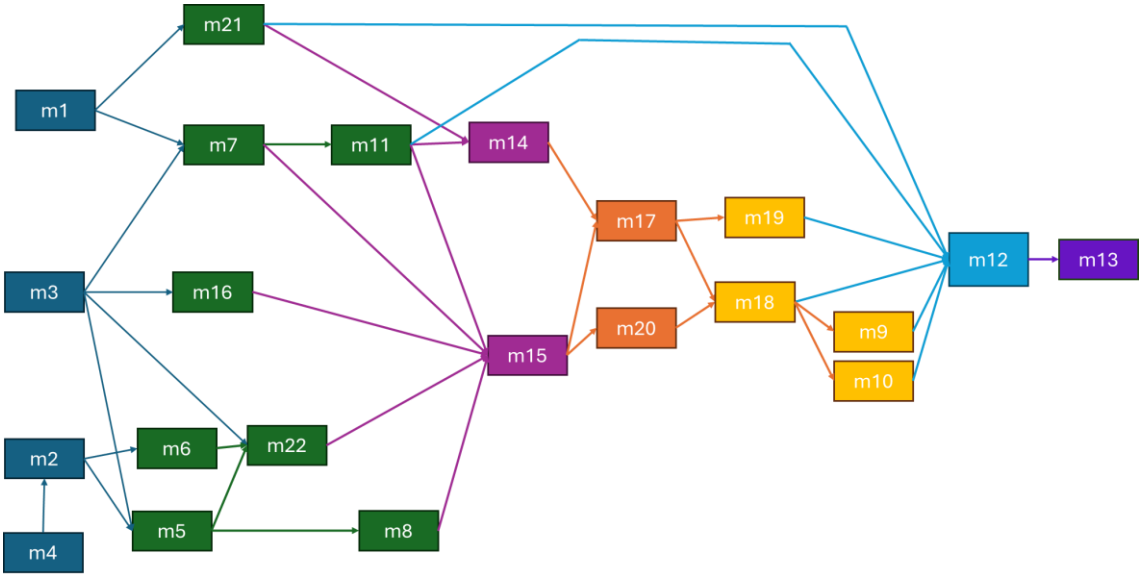

Figure 1 – Processes' Flow Diagram . Source: Self elaboration (2024)

2. Project definition and methodology

In order to enhance the plant's output and increase its profitability, the objective function to be minimized in the total makespan, i.e. from the start of the first operation until the completion of the last one. All relevant constraints must be modeled. After and exhaustive review of the literature, the Job Shop model was identified as the most suitable to reflect the characteristics of the factory. It was also decided to develop a custom algorithm to optimize job assignment. The heuristic logic operators employed in this algorithm are closely based on a comprehensive knowledge of the plant and its operations.

To enable task assignment, it was necessary to adapt the plant's operations to a mathematical model. Bread production differs significantly from the industries explored by most academic papers, which is reflected in how the machines handle operations. From the perspective of the Job Shop model, tasks are split into operations, and the machines are responsible for executing these operations. The Job Shop model assumes that a machine cannot perform more than one operation at a time, and papers that focus on extending the capability for simultaneous task execution typically do so through batching. However, the equipment used for shaping, fermenting, or cooling not only processes multiple operations simultaneously, but they also have operations begin and end at different times; i.e., entering and exiting the machines according to their specific processing times. Due to the lack of academic references, an equivalent model was developed: for each machine with capacity *n*, *n* machines with unitary capacity were modeled. This approach allows operations to enter and exit the machines as needed, without exceeding the original machine's maximum capacity.

In addition, the assignment of jobs must account for changes in units throughout the production process, as working with individual pieces of bread is not feasible. Tasks initially begin as UFAs (units of fabrication), which are later converted into trolleys. The number of trolleys equivalent to one UFA depends on the specific product reference associated with the task.

When designing the heuristic algorithm, the goal was to capitalize on the differences between two major product groups: Moitec and Artesana (*Artisan*). Moitec products make up most of the production volume and have relatively uniform itineraries and process times. In contrast, Artesana products exhibit greater variability in the time and machinery required. With this in mind, and considering the system's bottleneck, the following optimization strategy was developed:

1. Split the demanded Jobs into (i) Moitec or (ii) Artesana:

$$D_M = \{i \in D \mid i\ belongs\ to\ Moitec\} \quad \text{[Eq. 1]}$$

$$D_A = \{i \in D \mid i\ belongs\ to\ Artesana\} \quad \text{[Eq. 2]}$$

$$D_M \cap D_A = \emptyset,\ D_M \cup D_A = D$$

2. Maximize occupancy rate in cooling tunnel (m12), assigning only Moitec jobs:

$$\max\left(\frac{\sum_{i \in D_M} t_{process}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Eq. 3]}$$

$t_{proceso}(i, m12)$ →time that job i spends in tunnel(m12).

T_{total}→ total weekly makespan.

C_{12}→ tunnel maximum capacity

3. Assign Artesana jobs to fill the gaps left:

$$\max\left(\frac{\sum_{i \in D_A} t_{process}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Eq. 4]}$$

To improve the effectiveness of the algorithm in job scheduling, the following hypotheses were proposed:

Hypothesis I: Saturating the cooling tunnel first with products from the Moitec group, followed by those from the Artesana group, reduces the total makespan.

Hypothesis II: When saturating the tunnel with Moitec products, leaving *z* free gaps reduces the total makespan.

Hypothesis III: When saturating the tunnel with Moitec products, iterating with smaller time increments *t* reduces the total makespan.

Hypothesis IV: Starting the schedule with products that take less time—based on processing times—to reach the bottleneck reduces the total makespan.

Hypothesis V: Introducing randomness in the order in which tasks are iterated may result in significant improvements over a deterministic algorithm.

3. Results and conclusions

After testing the hypotheses through simulations, the validity of Hypotheses I, III, and V was confirmed. The final algorithm model is presented in Table 1.

Asignar en dos fases	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No
Incrementos de tiempo *t*	0,5
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0
Orden de tareas aleatorio	Sí

Table 1 – Algorithm model with final specifications. Source: Self elaboration (2024)

After 15 iterations of the algorithm—necessary due to the variability introduced by the fifth hypothesis—the best schedule achieved a reduction in the objective function of 1144.2 minutes, approximately 19 hours.

Closing the factory earlier each week allows for savings of €3,857.62 per week, combining the reduction of both labor costs and the energy consumption of certain machines. In contrast, the cost of maintaining the improvement operational is only €42.45 per week. The most significant expense is the initial investment, amounting to €7,270.10. A detailed breakdown is provided in Table 2.

AHORRO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Mano de Obra	2.699,83 €	semanal	2.699,83 €
Energía	1.157,79 €	semanal	1.157,79 €
		TOTAL SEMANAL	**3.857,62 €**
GASTO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Implementación	7.260,00 €	única	-
Licencias	11,70 €	anual	0,23 €
Mantenimiento	42,22 €	semanal	42,22 €
Amortización del equipo	3,37 €	semanal*	-
		TOTAL SEMANAL	**42,45 €**
		TOTAL INICIAL	**7.270,10 €**

*: Durante 3 semanas, previas a la puesta en marcha de la planificación

Table 2 – Savings and expenses expected after the implementation. Source: Self elaboration (2024)

The ample difference between weekly savings and expenses greatly eases the recovery of the initial investment, which is achieved before the end of the second week. The break-even point of the investment is illustrated in Figure 2.

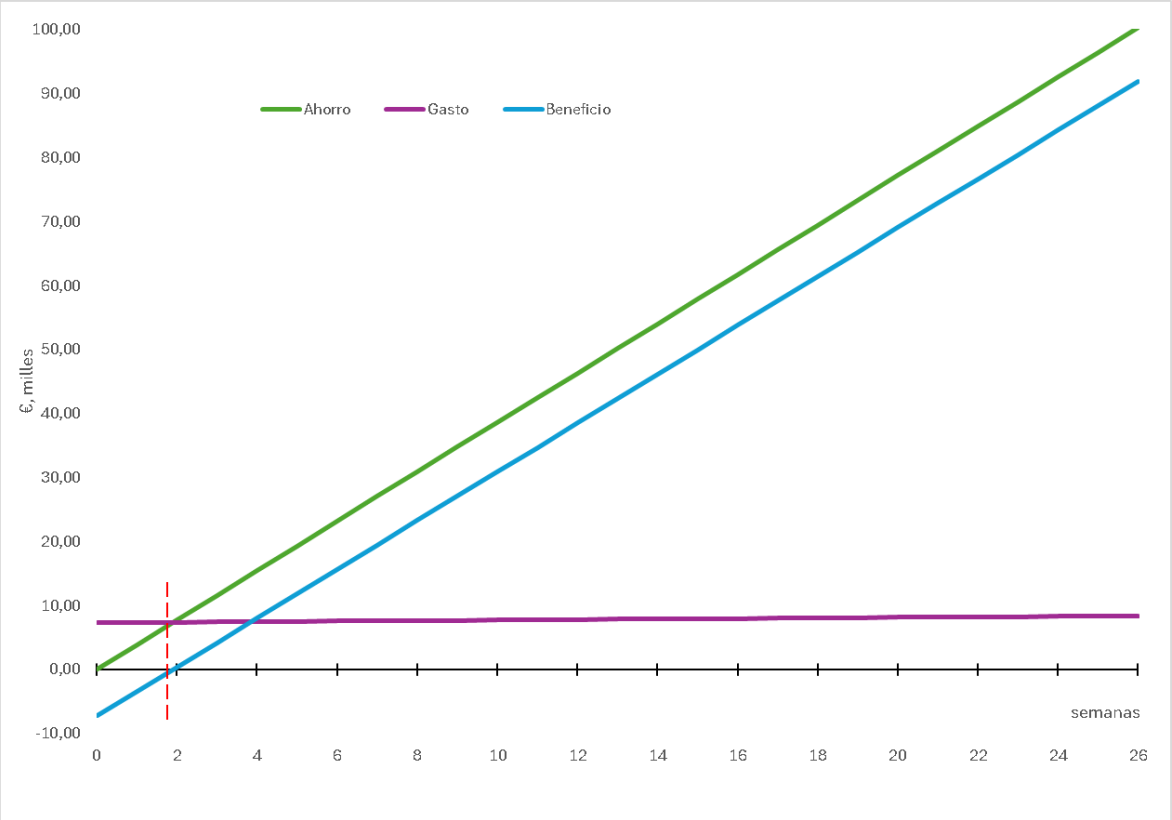

Figure 2 – Investment Break-Even Chart. Source: Self elaboration(2024)

Once the initial investment is recovered, the project generates an additional €3,815.17 in profit each week. Over the course of half a year (26 weeks), this accumulates to €91,924.45. Another major advantage of the project is its ease of implementation. With no new machinery or training required, a smooth and uninterrupted transition is ensured.

4. References

[1] Troadec, R.; Regnault, S.; Nestora, S.; Jacolot, P.; Niquet-Léridon, C.; Anton, P.M.; Jouquand, C. (2023). Effect of fermentation conditions of bread dough on the sensory and nutritional properties of French bread, Springer International Publishing

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción 5

1.1 La planta y la elaboración del pan 5

1.2 Desafío actual en la producción 7

1.3 Enfoque del proyecto 8

1.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9

Capítulo 2. Perspectivas de la planificación: un análisis de la literatura 10

2.1 El problema de la panificación 10

2.2 El Taller de Trabajo (Job Shop) 14

2.2.1 Marco conceptual general 14

2.2.2 Métodos de resolución 18

2.3 Metaheurística: el algoritmo genético fuente de programas 22

2.4 Precedentes de implementación heurística 25

2.6 Conclusiones 26

Capítulo 3. Modelado de la planta y algoritmo heurístico 27

3.1 Modelado: la planta y su demanda 27

3.2 El algoritmo 31

3.3 Hipótesis a validar 35

3.4 Conclusiones 37

Capítulo 4. Resultados de las hipótesis y modelo final 38

4.1 Asignación en dos fases 39

4.2 Comenzar productos sin horneado 40

4.3 Variaciones de los incrementos de tiempo 41

4.4 Liberación de huecos en el túnel de enfriamiento 43

4.5 Ordenado aleatorio de las tareas 46

4.6 Modelo final 46

4.7 Conclusiones 47

Capítulo 5. Viabilidad económica 48

5.1 Ahorro: reducción de costes tras la implantación 48

5.1.1 Sueldos 48

5.1.2 Energía 49

5.2 Gastos: costes de implementación 51

5.2.1 Servicios de ingeniería para la implementación 51

5.2.2 Licencia de programas 52

5.2.3 Mantenimiento del algoritmo 52

5.2.4 Amortización del equipo informático 53

5.3 Resultados finales 53

5.4 Conclusiones 55

Capítulo 6. Conclusiones y futuros desarrollos 56

Capítulo 7. Bibliografía 60

Índice de figuras

Figura 1. Espacios de complejidad, según se considere P≠NP o P=NP 18
Figura 2. Técnicas tradicionales 20
Figura 3. Técnicas avanzadas 21
Figura 4. Propuesta de marco basado en simulación MATLAB/SIMULINK para el Taller de Trabajo con AG 24
Figura 5. Diagrama de Gantt de la producción de la referencia 17 hasta llegar al túnel de enfriamiento 30
Figura 6. Diagrama de flujo de procesos 31
Figura 7. Comparación de incrementos de tiempo t 43
Figura 8. Gráfico de punto muerto de la inversión 54

Índice de tablas

Tabla 1.Hipótesis del Taller de Trabajo 15
Tabla 2. Hipótesis relajantes..... 16
Tabla 3. Conjunto de máquinas M 28
Tabla 4. Demanda semanal D..... 29
Tabla 5. Resultados de la asignación de Moitec y Artesana en distintas fases 39
Tabla 6. Resultados de priorizar la asignación de productos sin horneado..... 40
Tabla 7. Resultados de reducir los incrementos de tiempo t, con orden de tareas predeterminado..... 41
Tabla 8. Resultados de reducir los incrementos de tiempo t, con orden de tareas aleatorio 42
Tabla 9.1 Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas predeterminado..... 44
Tabla 9.2 Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas predeterminado..... 44
Tabla 10.1 Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas aleatorio 45
Tabla 10.2 Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas aleatorio 45
Tabla 11.Modelo con las especificaciones finales..... 46
Tabla 12. Costes de mano de obra, por hora 46
Tabla 13. Costes de mano de obra..... 49
Tabla 14. Costes de consumo de maquinaria, por minuto..... 50
Tabla 15. Costes de consumo de maquinaria 51
Tabla 16. Ahorros y gastos derivados de la implementación..... 53

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 LA PLANTA Y LA ELABORACIÓN DEL PAN

Novapan SL es una empresa panificadora zaragozana que produce panadería, pastelería, bombonería y piscolabis tanto para otras empresas del Grupo —como Panishop —, como para clientes externos —principalmente restauración y grandes superficies —. En el presente caso, se estudiará únicamente la producción de su planta principal, en el Polígono Malpica. En ella se fabrica exclusivamente pan. Se dejarán también de lado otros aspectos "internos" como previsiones de ventas, el aprovisionamiento o el almacenamiento de productos acabados.

La planta cuenta con tres líneas de producción, apodadas por la empresa "Moitec", "Viñas" y "Artesana". Sin embargo, ya que las dos primeras comparten mucha maquinaria y personal que imposibilitan su funcionamiento simultáneo, a efectos prácticos se considerarán como una única. Así, el reto a afrontar es la coordinación de estas dos líneas para cumplir con los objetivos de planificación semanal impuestos de forma exógena, a la vez que se maximiza la producción y la calidad.

La producción de pan es un proceso minucioso, que requiere de procesos, temperaturas, y tiempos muy precisos[1] que no pueden ser alterados, al menos desde la perspectiva de este proyecto. El enfoque buscado es por lo tanto la optimización a la hora de organizar qué productos y en qué cantidad se fabrican en cada momento en cada línea. Así, tratando los distintos cuellos de botella del proceso y consecuentes paradas innecesarias, es posible mejorar la eficiencia de la planta panificadora. Adicionalmente, permite asegurar a los clientes productos de mejor calidad, ofreciendo un proceso y resultado consistente, y que cumple con los estándares esperados.

[1] Troadec *et al*., (2023)

En la planta, el pan producido en ambas líneas pasa —existiendo excepciones—por los siguientes procesos:

i. Amasado: Existen dos amasadoras. Tienen la capacidad de trabajar en paralelo y están a disposición de ambas líneas Moitec-Viñas y Artesana, trabajando según éstas demanden. Internamente, nos referimos a cada gran unidad de "masa" que sale de una amasadora como UFA (Unidad de fabricación).
ii. Formado: En la línea Moitec-Viñas, es realizado de forma autónoma por máquinas que no requieren de asistencia por parte de los operarios. Sin embargo, en Artesana el formado es realizado manualmente, y en este estudio se incluyen en este proceso otros pasos realizados por esos mismos trabajadores.
iii. Entablado: En ambas líneas se hace manualmente. Supone el cambio de unidades de flujo, de UFAs a carros.
iv. Fermentación: Cada una de las líneas tiene cámaras de fermentación dedicadas, con capacidades diferentes. Al fermentar, el pan requiere de reposo en un entorno muy controlado[2] . Con la calidad como último objetivo, es crucial entre y salga de la cámara exactamente cuando le corresponde. De no hacerlo, no pasaría los estándares de calidad.
v. Horneado: Existen dos sistemas de horneado en la planta. Por un lado, un horno de piedra de gran capacidad. Por otro, una sala de hornos de aire que se cargan manualmente con carros enteros.
vi. Túnel de congelación: Al salir del horno, el pan ha de ser enfriado y posteriormente congelado para poder ser empaquetado. En este punto, el producto de ambas líneas confluye en un mismo flujo.
vii. Empaquetado: El producto precocido y congelado se empaqueta en distintos tipos de caja según el pan. Supone el paso de trabajar de carros a cajas.

[2] Troadec, *op cit*

A partir de este punto, el proceso depende de Logística y no de Producción, y queda fuera del enfoque del Proyecto.

1.2 DESAFÍO ACTUAL EN LA PRODUCCIÓN

En el presente, la empresa no dispone de un método automatizado de planificación de la producción. La organización se realiza basándose en históricos y la experiencia de los profesionales que trabajan en la planta y conocen en profundidad los procesos. Aun así, en ocasiones ocurren errores —humanos o fruto de las herramientas disponibles— que comprometen objetivos tanto operativos como de calidad.

Añadiendo complejidad a la elaboración manual de la planificación, la producción varía semanalmente, además de incorporarse nuevos productos para retirar otros. Con cada producto siguiendo un itinerario distinto y con diferentes tiempos de proceso, la coordinación de los recursos se vuelve crecientemente desafiante para la empresa.

Este método de proceder ha permitido satisfacer sus necesidades hasta el momento, pero es evidente el margen de mejora que deja el sistema actual. Al consultar a los ingenieros y encargados, concuerdan en que las instalaciones actuales pueden rendir a un mayor ritmo. El relativamente bajo grado de ocupación de las máquinas reafirma el consenso de los profesionales: mediante una mejor planificación, sin grandes intervenciones de capital, se puede mejorar notablemente la productividad de la planta.

Entre los retos a superar por el proyecto, sumado al estricto respeto de los tiempos de producción, se encuentra el cambio de unidades de flujo. En la fábrica se produce pan, pero éste no es la unidad operativa en la que se planifica la producción. Al fabricar un producto, las máquinas trabajan con UFAs, carros o cajas. Para diseñar una metodología de planificación, es necesario incorporar el cambio de unidades conforme ocurre.

1.3 ENFOQUE DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es por lo tanto aumentar la eficiencia de la planta, quedando pendiente la definición de la función objetivo. Será necesario para ello modelar todas las restricciones presentes del caso, bajo un diseño que permita a la herramienta de optimización operar correctamente.

La metodología de trabajo a seguir consistirá en las siguientes etapas, abarcando cada una de ellas un capítulo independiente en el presente proyecto:

- Estudio del estado de la cuestión:

  Se realizará una exhaustiva revisión de la literatura académica disponible, estudiando tanto marcos conceptuales y teóricos como casos reales de implementación en distintas industrias. La información recabada será de especial utilidad para el modelado de la planta y el diseño del algoritmo planificador.

- Modelado de la planta y confección de la herramienta optimizadora:

  Se desarrollará el enfoque escogido en el capítulo anterior, incorporando las particularidades de la planta panificadora. Se procederá entonces con el planteamiento de hipótesis respecto al algoritmo y los criterios lógicos que lo orienten.

- Resultados de la nueva planificación:

  La simulación de la metodología escogida ofrecerá los resultados necesarios para evaluar la eficacia de la nueva planificación, comparándola con la vigente en la empresa.

- Estudio de la viabilidad económica del proyecto:

  Con los resultados operativos disponibles, es posible evaluar el interés del proyecto para la empresa. Se estimará la inversión requerida para la implantación, así como los beneficios esperables.

- Conclusiones:

  Actuando como epílogo, recogerá los hitos alcanzados durante la elaboración del proyecto, señalando finalmente futuras líneas de desarrollo.

.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El presente proyecto incorpora los Objetivos del Desarrollo Sostenible como propios, asegurando que los incentivos operativos y económicos perseguidos —dentro de su alcance— contribuyan al desarrollo económico, social y ambiental.

Particularmente, son de relevancia para el proyecto el ODS 9: *Industria, Innovación e Infraestructura* , así como el ODS 12: *Producción y consumo responsables* .Una producción más eficiente operativamente se traduce en menores tiempos de procesamiento. La reducción de horas en las que las máquinas consumen energía es clave para combatir el derroche. Del mismo modo, eliminar periodos de inactividad de los trabajadores contribuye a una utilización más responsable del capital humano.

Capítulo 2. PERSPECTIVAS DE LA PLANIFICACIÓN: UN ANÁLISIS DE LA LITERATURA

En este capítulo, partiendo de la contextualización proporcionada por el capítulo introductorio anterior, se explorarán las complejidades que caracterizan la problemática de la planificación industrial. Concretamente, se analizarán los distintos enfoques propuestos por la literatura académica. Tras su estudio, será seleccionada la metodología más apropiada a las particularidades del caso presente, incluyendo tanto una recopilación de la teoría más relevante, como casos de aplicación concretos.

2.1 EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN

el Balance de líneas, la Planificación óptima del trabajo, el Lean Manufacturing, o el estudio de cuellos de botella.

Los cuellos de botella se encuentran en el centro de la Teoría de Restricciones (Theory of Constraints, *TOC*). Cuando se habla de restricciones, estas pueden ser de recursos, de materiales o relacionadas con las políticas empresariales[3]. Así, un cuello de botella se puede definir según distintos criterios. Y, de hecho, dependiendo del criterio escogido, la ubicación del cuello de botella variará.

Existen dos categoría de definiciones[4]: las basadas en (i) *Performance in Processing (*PIP), o en (ii) *Sensitivity*. Las primeras se centran en el rendimiento del sistema, e incluyen (i) tiempo medio de espera, y (ii) la utilización promedio. Las segundas miden que máquina

[3] Wieslaw y Rogowska (2020)
[4] Wang, Zhao y Zheng (2005)

tiene el mayor impacto sobre el sistema, incluyendo los cuellos de botella (i) de producción -que no tienen en cuenta rentabilidad-, y (ii) económicos .

Una vez definido el criterio a seguir, es necesaria la detección del cuello de botella en el sistema a optimizar. Tras recopilar múltiples métodos, se desarrolló un sistema flexible que consta de 8 pasos[3] . Entre estos se incluye la identificación de flujos, medidas de tiempos, cálculos y estimaciones. Sin embargo, en 2015 un nuevo proceso fue publicado: El paseo del cuello de botella (*The Bottleneck Walk)*[5]. Su principal ventaja es que permite la detección -y actuación- prácticamente en tiempo real, en vez de trabajar con datos históricos con fines preventivos.

Para ello, revisa la definición de lo que constituye un cuello de botella, afirmando que son "procesos que influencian el rendimiento del sistema entero. A mayor influencia, más relevante es el cuello de botella". Bajo este criterio, propone "caminar" a lo largo de la línea, observando cada máquina o subproceso. Se ha de determinar: si está *blocked* (bloqueado, el amortiguador siguiente está lleno) o *starved* (no alimentado, el amortiguador anterior está vacío), dicho subproceso no es el cuello. Éste será entonces un subproceso que esté o funcionando, o parado por motivos de mantenimiento, preparación, avería o parada planeada. Los amortiguadores indican por lo tanto la dirección del cuello de botella, guiando al responsable en tiempo real, sin formación necesaria y de manera intuitiva.

Conforme pasa el tiempo y avanza la producción, los cuellos de botella se mueven (*shift*) a lo largo de la línea. Otro método propuesto[6] permite simular y prevenir cuellos de botella a través de datos de tiempo de uso. Posteriormente, otros autores presentaron un método capaz de adaptarse a sistemas complejos, detectando los cuellos de botella conforme aparecen a través de la recopilación y tratamiento de datos en tiempo real.[7]

[5] Roser *et al*., (2015)
[6] Roser *et al.*, (2003)
[7] Roh *et al.*, (2018)

La detección de cuellos de botella es compatible con otras técnicas[8]. Tras detectar el cuello y proponer varias soluciones, la combinación con herramientas Lean (ECRS para simplificar procesos) y de Balance de líneas (reduciendo tiempos de espera) permitía reducir costes en mano de obra.

En el ámbito del Balance de líneas (*Line Balancing*), al tratar con escenarios complejos en los que fluyen distintas referencias por varias líneas -como es el caso de nuestra panificadora-, existen dos modelos: el modelo de Línea Múltiple, y el modelo Mixto. En el primero, los productos tienen diferencias significativas y requieren de cambios en la configuración de la línea. En el segundo, los procesos son similares y no requieren de ajustes, lo que permite lanzar los productos sin formar lotes.[9]

Existen multitud de métodos para solucionar problemas de Balance de líneas[10], como la regla del mayor candidato (*Largest Candidate Rule)*, la regla de Kilbridge and Westers, o la de Pesos posicionales clasificados (*Ranked Positional Weights Rule)*.

La Planificación óptima del trabajo (*Optimal Job Scheduling*) es un área de gran interés en la comunidad científica, ofreciendo un marco para el modelado de sistemas. Bajo este enfoque de la producción, se utiliza la siguiente nomenclatura: se trata con (i) *tareas*, siendo éstas conjuntos de (ii) *operaciones* que son procesadas por (iii) *máquinas*. "El objetivo es encontrar una secuencia para cada máquina, tal que se minimice una función del tiempo de finalización, y de tal forma que dos operaciones no se procesen simultáneamente en una misma máquina"[11].

[8] Ongkunaruk y Wongsatit, (2014)
[9] Reginato *et al.*, (2016)
[10] Manaye, (2019)
[11] Arisha, Young y El Baradie (2001)

Dentro de este régimen de modelado se encuentran varios casos generales, y aunque cada uno de ellos cuenta con subtipos marcados por distintas restricciones, lo que los diferencia a grandes rasgos es:

a) Taller Abierto (*Open Shop*): "En general, […] cada máquina puede procesar como máximo una operación a la vez y no se da ningún orden para procesar los trabajos en las máquinas."[12]

b) Taller de Trabajo (*Job Shop*): Existe una variedad de tareas a ser completadas, pero diferencia del Open Shop, éstas se deben realizar en un orden específico. Y aunque las operaciones requieran de máquinas especializadas, no todas siguen la misma ruta. [13]

c) Taller de Flujo (*Flow Shop*): Al realizar una tarea, las operaciones han de ser ejecutadas siguiendo una ruta o flujo (*flow*) predeterminado. Contrariamente al Job Shop, todas las tareas siguen este mismo único flujo.[14]

Se han estudiado versiones más concretas de estos modelos, como las llamadas variantes flexibles: el *Flexible Job Shop* o *Flexible Flow Shop*. Tienen la cualidad de no restringir una operación a una única máquina, sino que se disponen de varias capaces de ejecutar la operación.[15] Se tratan por ende de enfoques menos generales, a los que no todos los escenarios se podrán adaptar. Es el caso de la planta a optimizar en este estudio, como se discutirá posteriormente.

[12] Ahmadian *et al.*, (2021)
[13] Pinedo, (2016)
[14] Pinedo, *op cit.*
[15] Özkul, A.O. *et al.*, (2021)

2.2 EL TALLER DE TRABAJO (JOB SHOP)

2.2.1 MARCO CONCEPTUAL GENERAL

Xiong *et al.*[16] realizan un profundo estudio acerca de la clasificación de las distintos tipos de Taller de Trabajo. En él se recogen las 21 hipótesis básicas sobre las que recae el modelo clásico (Tabla 1).

La diversidad en la problemática existente impide que todas estas hipótesis sean aplicables en todos los casos, por lo que la comunidad científica ha desarrollado otra serie de hipótesis relajantes (*relaxing assumptions*), también recogidas en el mismo estudio (Tabla 2).

[16] Xiong *et al.*, (2022)

Mark	Description
AC1	All jobs are released at time zero for processing. The number of jobs is pre-known and fixed. No job is permitted to be canceled during processing.
AC2	All machines are available at time zero.
AC3	All jobs have the same weight.
AC4	All jobs do not specify due dates.
AC5	There is no arbitrary priority among different jobs.
AC6	Each operation is given a unique and predetermined processing time.
AC7	Each job is specified previously a unique and fixed processing routing, i.e., technological sequences among operations of a job.
AC8	Jobs are independent from one another, i.e., there are no precedence constraints among the operations of different jobs.
AC9	Each operation can only be pre-assigned to only one machine for processing, i.e., no path flexibility is considered.
AC10	An operation of a job can be performed by only one machine at a time, i.e., no multiprocessor case is considered.
AC11	Each machine can perform only one operation at a time on any job, i.e., no batch processing is considered.
AC12	Waiting is permitted between the processing of adjacent operations on the same job.
AC13	Machines are independent of each other.
AC14	Once an operation is started, it must be completed without interruption.
AC15	Once an operation is started, it must be completed without preemption.
AC16	No reentrancy is not considered, i.e., a job does not visit the same machine twice or more.
AC17	Setup times of machines and transit times between operations are negligible, i.e., these times are assumed to be included in the operations' processing time.
AC18	All machines are continuously available without consideration of machine breakdown and maintenance.
AC19	Re-processing for unqualified jobs and insertion of emergency jobs are not considered.
AC20	No operator constrain is considered.
AC21	Capacities of buffer, warehouse and container are not considered or assumed to be unlimited; auxiliary tool and appliance are always available.

Tabla 1 – Hipótesis del Taller de Trabajo. Fuente: Xiong et al., (2022)

JSSP basic types	Subtypes	Codes	Relaxation
Classical JSSP		ST1	Na
Dynamic JSSP (DJSS)	Related to time attributes of jobs	ST2	AC6
	Related to the number of jobs	ST3	AC1, AC19
	Related to qualities of jobs	ST4	AC19
JSSP considering the machine availability	Considering machine breakdown	ST5	AC18
	Considering periodic maintenance	ST6	AC18
	Considering state-based maintenance	ST7	AC18
Flexible JSSP (FJSS)	PPFJSSP with machine-independent processing times	ST8	AC9
	PPFJSSP with machine-dependent processing times	ST9	AC9
	CPFJSSP with machine-independent processing times	ST10	AC9
	CPFJSSP with machine-dependent processing times	ST11	AC9
	TFJSSP	ST12	AC7
JSSP considering batches	parallel batch JSSP	ST13	AC11
	batch decision JSSP	ST14	Na
JSSP considering setup times	JSSP with sequence-dependent setup time	ST15	AC17
	JSSP with sequence-independent setup time	ST16	AC17
JSSP with nondeterministic or nonconstant processing time	With start time-dependent deteriorating jobs	ST17	AC6
	With controllable processing times	ST18	AC6
	With random distribution processing times	ST19	AC6
	With fuzzy processing times	ST20	AC6
Distributed JSSP (DSJSSP)	DSJSSP in different cells	ST21	Na
	DSJSSP in different lines	ST22	Na
	DSJSSP in different factories	ST23	Na
JSSP with dual-resource constraints (DRJSSP)	Considering availabilities of machines and operators	ST24	AC20
JSSP considering energy and pro-environment	JSSP with energy consumption related criteria	ST25	Na
	JSSP with carbon footprint related criteria	ST26	Na
	JSSP with noise emission related criteria	ST27	Na
JSSP less studied in the literature	JSSP with prior job	ST28	AC5
	JSSP with dependent jobs	ST29	AC8
	JSSP with no-wait constraint	ST30	AC12
	JSSP with blocking constraint	ST31	AC21
	JSSP with reentrancy	ST32	AC16
	JSSP with premeptibility	ST33	AC15
	JSSP considering overtime work	ST34	Na
	JSSP with limited buffer capacity	ST35	AC21
	JSSP considering outsourcing (subcontracting)	ST36	Na
	JSSP considering robot or automated guided vehicle (AGV)	ST37	Na

Tabla 2 – Hipótesis relajantes. Fuente: Xiong et al., (2022)

En la Tabla 2 aparece el ya mencionado Taller de Trabajo flexible, a su vez clasificado en subtipos. La mayoría incumplen la hipótesis AC9 ("Cada tarea sólo puede preasignarse a una máquina para su procesamiento, es decir, no se tiene en cuenta la flexibilidad de la ruta"), aunque la variante de flexibilidad total (TFJSSP) incumple la más rígida AC7, ya que permite flexibilidad no sólo en las máquinas a usar, sino también en la ruta a seguir.

De especial atención para el presente caso son las hipótesis básicas AC12 ("Se permite la espera entre el procesamiento de operaciones adyacentes en la misma tarea.") y AC21 ("Las capacidades de almacenamiento intermedio, almacén y contenedor no se consideran ni se suponen ilimitadas; siempre se dispone de herramientas y aparatos auxiliares.").

Es recogida también la distinción entre el Taller de Trabajo estático y dinámico. Tal como indica el artículo, en el primero durante el proceso no se producen cambios en los elementos implicados; mientras que en el dinámico hay atributos susceptibles a variación. Cabe notar igualmente la distinción de los Talleres no determinísticos, donde se incumple la hipótesis básica AC6 ("A cada operación se le asigna un tiempo de procesamiento único y predeterminado").

Una última aportación de Xiong *et al.* de gran relevancia para el estudio presente es su compilación de los distintos criterios de optimización -a maximizar o minimizar, según el caso- que puede seguir el algoritmo. Dependiendo de las necesidades concretas del proyecto, se pueden establecer direcciones de optimización basadas en el tiempo, número de tareas, costes, ingresos o energético- medioambientales.

En esta extensa taxonomía se proporciona un marco conceptual esencial para abordar la complejidad del Taller de Trabajo, permitiendo situar el proyecto a ejecutar. Resultará fundamental en fases posteriores, tanto para el modelado del sistema de manera eficiente, como para la determinación de la función objetivo del algoritmo de optimización.

2.2.2 MÉTODOS DE RESOLUCIÓN

El Taller de Trabajo es un problema NP-complejo (o NP-difícil, del inglés *NP-hard*), excepto en versiones enormemente simplificadas en número de máquinas y operaciones por tarea.[17] El acrónimo NP proviene de "Nondeterministic Polynomial-time"; es decir, un problema en NP tiene una solución verificable en tiempo polinomial mediante un proceso no determinista. Es conveniente tratar con problemas solucionables en tiempos polinomiales, en contraposición de los exponenciales. En estos últimos, al aumentar las dimensiones del problema, los tiempos crecen a un ritmo mucho mayor.

Por otro lado, etiquetar un problema como NP-complejo indica que para este no se conoce un algoritmo que lo resuelva en un tiempo polinomial. Parte del espacio NP-complejo se encuentra dentro de NP y se llama NP-completo (partiendo de una solución, se puede verificar en tiempo polinomial), y el resto no es NP (no se puede verificar en tiempo polinomial).Es por lo tanto igual o más *difícil* que los problemas en NP. El poder resolverlo en tiempo polinomial implicaría la capacidad de resolver todos los problemas en NP en tiempo polinomial también.[18]

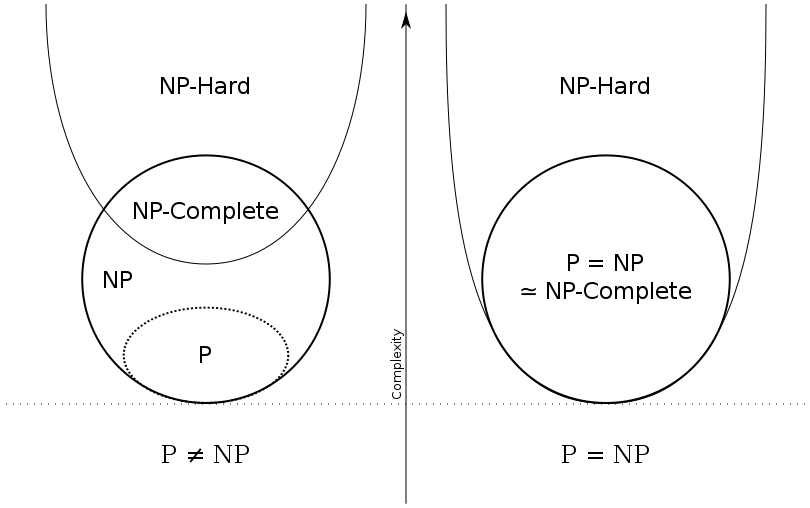

Figura 1 – Espacios de complejidad, según se considere P≠NP o P=NP. Fuente: Behnam Esfahbod, (consultado 2024)

[17] Gromicho *et al.*, (2012)
[18] Du *et al.*, (2022)

Las técnicas para encontrar la solución -no necesariamente la óptima- son clasificadas por Arisha *et al.*[19] en dos grandes categorías: las tradicionales y las avanzadas. Las primeras a su vez, son divididas en dos subcategorías: técnicas analíticas y heurísticas. Los métodos o técnicas concretas se encuentran recogidos en las Figuras 2 y 3. Del estudio se puede concluir lo siguiente:

Las técnicas analíticas se basan en modelos matemáticos que exploran exhaustivamente las soluciones posibles. Ejemplo de ello son la enumeración -explícita, implícita o parcial-, o la programación líneas e integral. Su principal ventaja es que, al encontrar la solución, aseguran que ésta sea la óptima: esta solución exacta no es mejorable.

Su fundamental inconveniente se manifiesta consecuentemente al afrontar la escalabilidad: la complejidad de los Talleres de Trabajo (problema NP-complejo) requiere de inmensas cantidades de recursos computacionales, haciendo impráctica o inviable su solución. Además, casos como el de la programación lineal tienen otros problemas, como que "algunas o muchas restricciones de la práctica no pueden ser representadas como lineales" .

La heurística responde a esta carencia aportando soluciones precisas, aunque no necesariamente óptimas, de forma más rápida. Se basan en reglas o aproximaciones para buscar soluciones aceptables. Entre otros métodos, el estudio recoge los algoritmo de búsqueda local (*Local search algorithms*), la búsqueda tabú (*Taboo search*) o la búsqueda de vecindad (*Neighbourhood method*). Una heurística no mencionada por los autores es el Cuello de Botella Cambiante (Shifting Bottleneck Heuristic). A través de multitud de iteraciones, se encuentran las máquinas con mayores colas. Así se identifican dinámicamente los cuellos de botella, encontrando soluciones al Taller de Trabajo.[20]

[19] Arisha *et al.*, (2001)
[20] Pinedo, *op cit.*

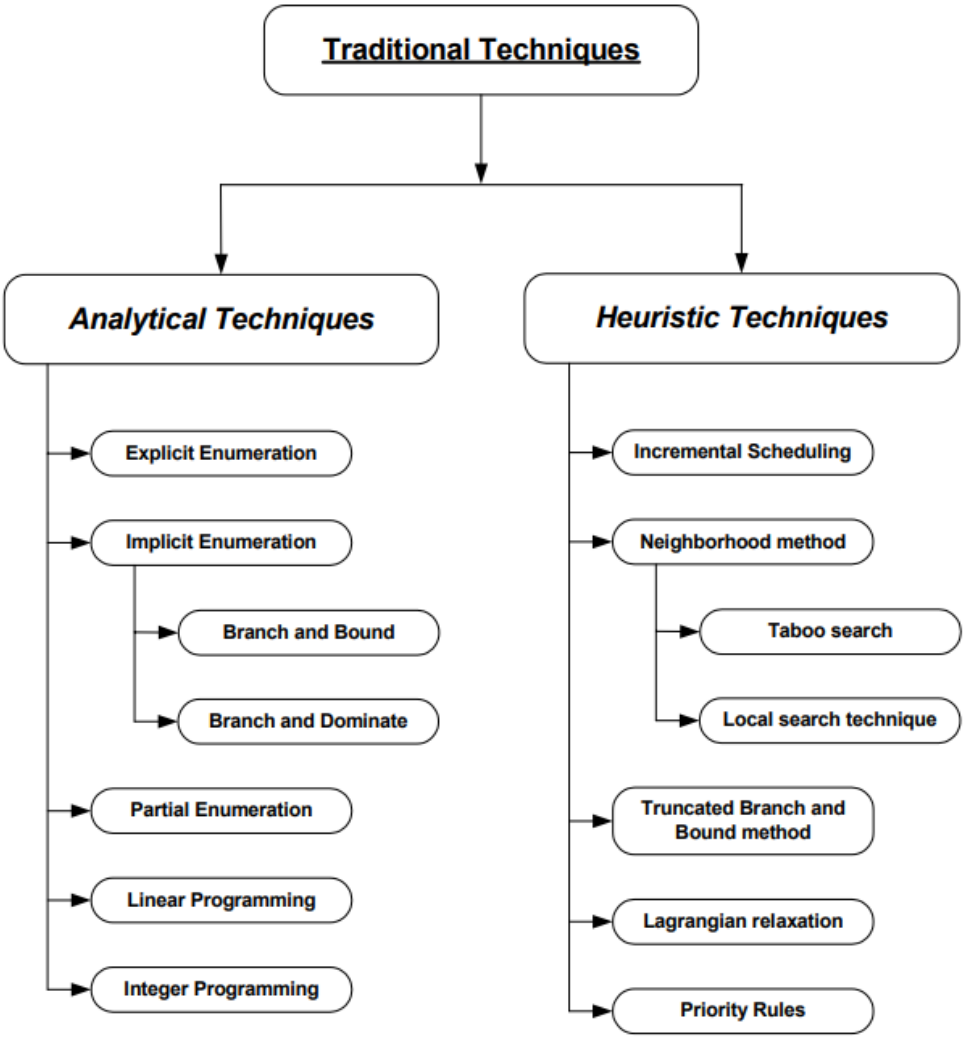

Figura 2 – Técnicas tradicionales. Fuente: Arisha et al., (2001)

En la categoría de técnicas avanzadas, los autores incluyen (i) la simulación, (ii) la inteligencia artificial, y (iii) los algoritmos de reparación (*Repair-Based algorithms*):

> Al modelar sistemas complejos, la simulación facilita la toma de decisiones rutinarias. Refleja el comportamiento del sistema y las consecuencias de las acciones tomadas. Programas como *ARENA Simulation Software* están diseñados para ser intuitivos y directamente reflejan información de gran utilidad como "el grado de uso

de las máquinas, tiempo de inactividad de cada máquina, longitud de las colas, tiempo de espera y otra información."[21]

La inteligencia artificial ofrece una variedad de soluciones como las redes neuronales, la lógica difusa (*Fuzzy Logic*) o los algoritmos genéticos. Se profundizará en estos últimos posteriormente.

Por último, los algoritmos de reparación ofrecen un gran nivel de adaptabilidad ante los imprevistos propios de la producción, siendo eficaces en la replanificación. Esta forma de trabajo ha señalada como más natural para los operarios humanos.

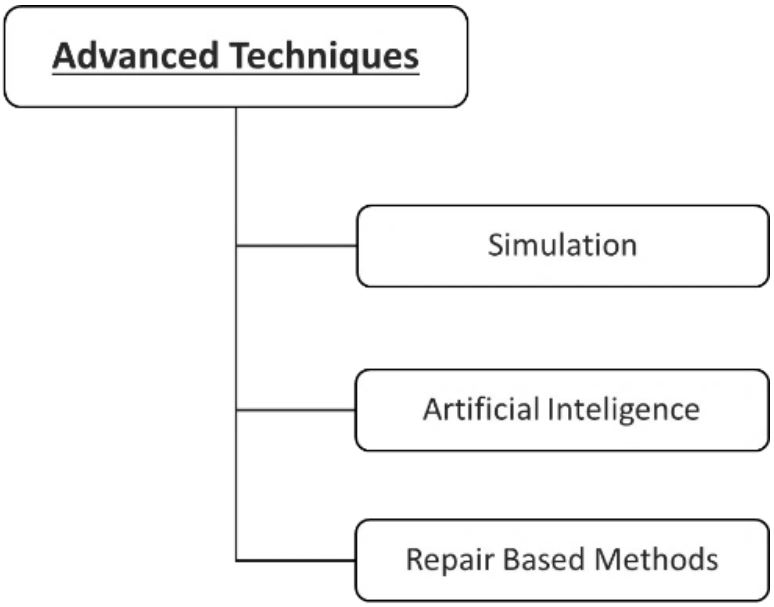

Figura 3 – Técnicas avanzadas. Fuente: Elaboración propia (2024)

[21] Gamal *et al.*, (2013)

2.3 METAHEURÍSTICA: EL ALGORITMO GENÉTICO

En el apartado anterior se argumenta por qué la heurística puede resultar de mayor utilidad que los métodos exactos a la hora de solucionar ciertos problemas. Se ha presentado a los Algoritmos Genéticos (AG o *GA*, del inglés *Genetic Algorithm*) como una "técnica avanzada", que en realidad pertenece la metaheurística, más concretamente al grupo de los algoritmos evolutivos.

Lo que los diferencia de la heurística tradicional, y origina su prefijo diferenciador "meta", es su enfoque no individualizado. Mientras que la heurística desarrolla modelos definidos para abordar cada problema concreto, la metaheurística simplemente da especificaciones sobre cómo realizar la búsqueda de la solución. El reto del implementador generalmente se facilita: ya no es el desarrollo de un modelo desde cero, sino la adaptación de una solución general a su caso particular. Sin embargo, casos con un gran número de particularidades y excepciones pueden tener un efecto contrario en la complejidad de su implementación

Dependiendo de la técnica metaheurística, esta selección o búsqueda de la solución puede ser de tipo (i) "solución-a-solución" o (ii) basada en conjuntos:

i. Solución-a-solución: se toma una solución *actual* del espacio de soluciones posibles. A través de la iteración, se explora el vecindario (neighbourhood) en búsqueda de una solución mejor. Este vecindario está comprometido por las soluciones más próximas de dicho espacio.
ii. Basada en conjuntos: En vez de tratar con soluciones individuales, el estado *actual* está formado por una *población* de soluciones candidatas. Entre otros, es el caso del algoritmo genético, que será tratado a continuación.[22]

[22] Ólafsson, (2006)

Las bases del algoritmo genético son revisadas por Barat[23], que también proporciona un ejemplo de su aplicación en el Taller de Trabajo. Los mecanismos fundamentales del AG explicados a continuación se basarán en su artículo. Se pueden sintetizar en cuatro conceptos: inicialización, selección, cruzamiento y mutación.

i. Inicialización: En el espacio de todas las soluciones posibles, se elige aleatoriamente a los individuos que conformarán la primera generación.
ii. Selección: Dependiendo del objetivo a maximizar o minimizar por el algoritmo, se obtendrá el resultado de cada individuo en dicha marca -por ejemplo, la duración (*makespan*) total de todas las tareas-. Mediante diferentes metodologías, se compararán y seleccionarán los mejores individuos de la generación.
iii. Cruzamiento: Es el mecanismo que permite producir nuevas crías o soluciones. Se basa en la combinación de sus dos progenitores (dos de las soluciones seleccionadas en el paso anterior). Existen varios tipos de cruzamiento, dependiendo del número de cromosomas intercambiados o de las posiciones dentro del cromosoma que se en cada progenitor . Este paso es también conocido como recombinación. El autor señala también como "una tasa de cruzamiento demasiado alta perturbaría a los individuos más rápido de lo que podrían ser explotados. Típicamente, la tasa de cruce tiene valores entre 0,3-0,7."
iv. Mutación: Este operador impide el estancamiento de la población en extremos relativos, actuando directamente sobre el cromosoma. Añade variabilidad, cambiando el valor de algunos genes con tanta frecuencia como la probabilidad de mutación establezca. Valores demasiado elevados propiciarán un algoritmo que incapaz de retener a los mejores individuos, volviéndolo en una búsqueda aleatoria. Al contrario, tasas demasiado bajas fomentan la aparición de super organismos[24] que impiden alcanzar la solución óptima. Se mencionan distintos tipos de mutación.

[23] Barat, (2013)
[24] Bożejko y Makuchowski, (2011)

Existen en la literatura ejemplos de aplicación de algoritmos genéticos en Talleres de Trabajo; desde enfoques teóricos orientados a desarrollar modelos y conclusiones de carácter general -basándose para ello en bases de datos-, hasta casos de implementación industrial encauzados a obtener una mejoría en la eficiencia de una planta real. Diversos ejemplos son la implementación con MATLAB/SIMULINK[25], el ajuste de la tasa de mutación online y offline[26], o algoritmos genéticos híbridos[27]. En este último caso, Pan y Huang obtuvieron los siguientes resultados: una convergencia en menos generaciones (aunque mucho mayor tiempo debido a la intensidad computacional) en el caso de 6 tareas y 6 máquinas (ambos algoritmos alcanzaron el óptimo), o una mejoría máxima del 3.18% en la calidad de la solución para la muestra de mayor tamaño, de 30x10. Los AGH se caracterizan por incluir un operador genético adicional a los clásicos (inicialización, selección, cruzamiento y mutación), que en este caso se trata del ATSP -heurística- aplicada exclusivamente para explorar el vecindario de una sección del cromosoma.

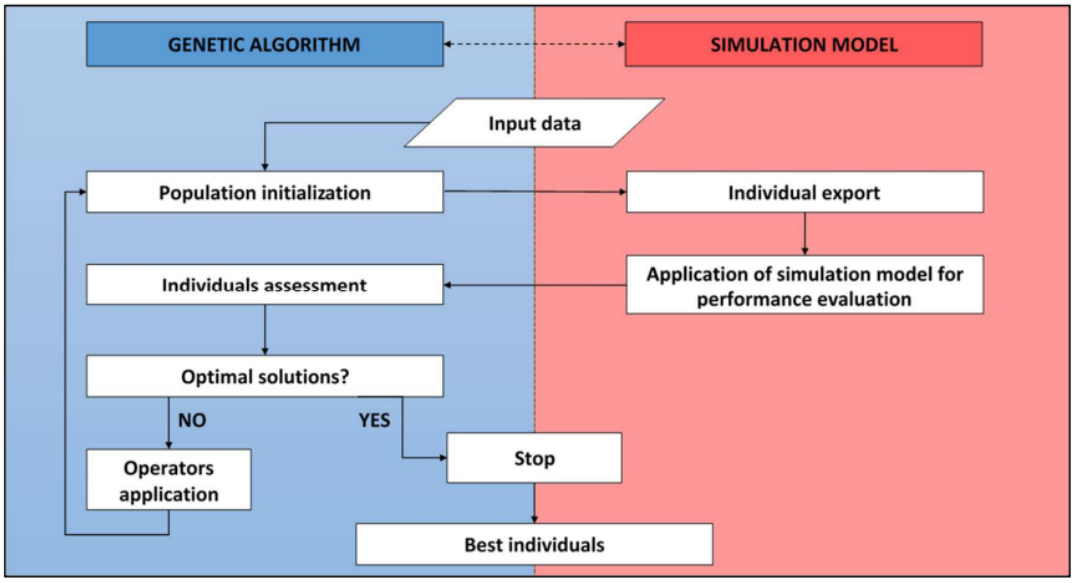

Figura 4 – Propuesta de marco basado en simulación MATLAB/SIMULINK para el Taller de Trabajo con AG. Fuente: Fumagalli et al., (2017)

[25] Fumagalli *et al.*, (2017)
[26] Bożejko y Makuchowski, *op cit.*
[27] Pan y Huang, (2009)

2.4 PRECEDENTES DE IMPLEMENTACIÓN HEURÍSTICA

Tal y como se ha indicado en la sección anterior, el uso de técnicas metaheurísticas ve su gran baza -la flexibilidad- diezmada en aquellos escenarios en los que se requiere de un gran número de adaptaciones; un enfoque generalista (como el AG) necesitaría un gran número tanto de restricciones como de extensiones para modelar la planta panificadora que nos concierne.

Es por ello que los marcos teóricos anteriormente mencionados referentes al AG no serán tomados como modelos al desarrollar el proyecto, sino que se implementará un algoritmo heurístico propio. Este está diseñado específicamente para satisfacer los requerimientos concretos de la planta panificadora, lo que representa una ventaja al aprovechar el conocimiento detallado del proceso por parte del desarrollador.

Tal como se explica en Heurística en el Taller de Trabajo[28], la heurística debe adaptarse a las peculiaridades del proceso; las reglas usadas para asignar las tareas deben ser probadas -simulando el proceso completo-, por lo que en el siguiente capítulo se formularan distintas hipótesis a examinar.

En la literatura existen múltiples aplicaciones de heurísticas en el ámbito del *Job Scheduling*. D. Gupta destaca como autor de muchas ellas, entre las que es de especial relevancia para nuestro caso su heurística para el NWFSP[29] (*no-wait Flow-Shop problem*). Aunque en nuestra planta tratemos con un Job Shop y no un Flow Shop, y nuestras máquinas realicen múltiples tareas simultáneamente, su ejemplo propone conceptos útiles. En su artículo, los autores implementan en primer lugar una heurística constructiva, para después aplicar una de mejora.

Mediante la primera etapa se crea paso a paso una solución, insertando elementos sin buscar necesariamente que el orden sea el idóneo, pues se conoce que éste cambiará es la siguiente

[28] Gere, (1966)
[29] Nailwal, *et al.*, (2016)

etapa. La heurística de mejora actúa entonces sobre la solución inicial, refinándola para mejorar la función objetivo o intentando escapar óptimos locales. La alternativa es crear un único algoritmo heurístico ya orientado a entregar una solución de suficiente calidad; dependiendo del problema concreto a resolver, será más sencillo implementar un método u otro.

Otros algoritmos heurísticos se apoyan en reglas como asignar en primer lugar las tareas con menor duración, por orden de llegada (*First Come, First Served*) o penalizando retrasos en caso de tener fechas de entrega independientes para cada tarea.[30]

2.5 CONCLUSIONES

Tras revisar los métodos ofrecidos por la investigación operativa para afrontar el caso presente de planificación industrial, se ha optado por el modelado de la planta basándose en el problema NP-complejo del Taller de Trabajo, en concreto en su versión sin esperas (NWSJP, *no-wait Job-Shop problem*). La elección del modelo se justifica por su conveniente enfoque global de la producción, considerando tareas, operaciones y máquinas. Las hipótesis relajantes del NWSJP permiten adaptar la necesidad de seguir una ruta específica al ejecutar una tarea, anulando la posibilidad de tiempos de espera entre operaciones consecutivas. La adaptación del caso presente a dicho modelo será discutida en el siguiente capítulo.

En cuanto a la resolución del problema NP-complejo, las técnica heurísticas ofrecen referencias de implantación respaldadas por numerosos estudios. Esto deriva de su enfoque individualizado a cada problemática, utilizando los conocimientos propios de cada industria y sus procesos. La revisión de los precedentes académicos proporciona una comprensión que permite anticipar potenciales dificultades a enfrentar en los capítulos subsiguientes. Las hipótesis propuestas próximamente deberán respetar las restricciones concretas del Taller de Trabajo presente, optimizando la función objetivo a definir.

[30] Ehsaei, M. y Nguyen, D.T, (2017)

Capítulo 3. MODELADO DE LA PLANTA Y ALGORITMO HEURÍSTICO

En base a lo analizado durante el capítulo anterior, a continuación se modelarán las particularidades de la planta panificadora, así como se expondrá el método de asignación de tareas. Tras presentar el algoritmo, se formularán las hipótesis para la optimización de éste. La evaluación de dichas hipótesis será llevada a cabo en el capítulo subsiguiente.

3.1 MODELADO: LA PLANTA Y SU DEMANDA

La fábrica presente cuenta con 22 máquinas independientes entre sí, **M**. Al contrario de la inmensa mayoría de los casos publicados, todas ellas trabajan simultáneamente varias operaciones —pertenecientes a distintas tareas— . En concreto, 3 de ellas lo hacen en lotes —las operaciones entrantes empiezan y terminan al mismo tiempo—, mientras que las otras 19 máquinas procesan operaciones que entran y salen a destiempo —nos referiremos a ellas como máquinas de trabajo continuo—. Esto, que es esencial en procesos como la fermentación o el túnel de enfriamiento rápido, no ha recibido especial atención en la investigación operativa.

Para adaptar la casuística a las herramientas disponibles, se ha configurado lo siguiente: por cada máquina de trabajo continuo con capacidad *n*, se han dispuesto *n* máquinas con capacidad unitaria. Así, el modelo permite la entrada y salida de operaciones durante el tiempo requerido por cada una, sin sobrepasar la capacidad máxima de la máquina continua original. Para simplificar la implementación, se ha aplicado esta equivalencia también a las máquinas que operan en lote: imponiendo la restricción de que las operaciones en ellas deben empezar y terminar simultáneamente, logrando así respetar el problema original.

Es así como un problema de 22 máquinas —un tamaño ya considerable comparándolo con otros de la literatura mostrados en el capítulo anterior—, se transforma en uno de 188 máquinas, tal y como se refleja a continuación en la Tabla 3.

M	Capacidad	**M**	Capacidad
m1	2	m12	24
m2	2	m13	2
m3	2	m14	33
m4	2	m15	18
m5	2	m16	2
m6	4	m17	5
m7	6	m18	30
m8	2	m19	20
m9	2	m20	6
m10	2	m21	10
m11	10	m22	2
		TOTAL	**188**

Tabla 3 – Conjunto de máquinas M. Fuente: Elaboración propia (2024)

Las tareas a ejecutar vienen incluidas en la demanda semanal **D**, que contiene tanto las referencias *r* y la cantidad *q* a producir de cada una. Es un pedido impuesto externamente, y en este estudio se utilizará la demanda representada en la Tabla 4, con 43 referencias distintas y constituyendo un total de **833** tareas.

D			
r	*q(r)*		
r1	14	r22	22
r2	6	r23	14
r3	36	r24	192
r4	27	r25	15
r5	12	r26	4
r6	152	r27	12
r7	4	r28	30
r8	5	r29	5
r9	12	r30	4
r10	3	r31	4
r11	6	r33	4
r12	3	r34	6
r13	8	r35	9
r14	9	r36	9
r15	7	r37	4
r16	62	r38	9
r17	3	r39	4
r18	50	r40	8
r19	6	r41	18
r20	4	r42	12
r21	9	r43	10
		TOTAL	**833**

Tabla 4 – Demanda semanal D. Fuente: Elaboración propia (2024)

Tal como estipula el Taller de Trabajo, cada tarea está formada por un número distinto de operaciones. Estas operaciones solo pueden ser realizadas en las máquinas concretas que les corresponden de manera predeterminada. Al tratarse de un NWJSP, no puede haber esperas entre operaciones. Así, al introducir una tarea en la planificación, el tiempo de inicio y fin de cada operación queda determinado.

A su vez, una importante particularidad de la industria panificadora es la coexistencia de distintas unidades de flujo a lo largo de los procesos: en este caso, se trabajará con UFAs (unidades de fabricación) y carros. Las primeras se utilizan en procesos como el amasado o la autólisis —los primeros pasos de la producción—, mientras que los carros predominan en fermentación, horneado o enfriado rápido —los últimos—. Todas las tareas

combinan UFAs y carros a lo largo de sus operaciones, y el número de carros que corresponden a cada UFA depende exclusivamente de la referencia. Cada tarea demandada en **D** corresponde con una UFA, y por lo tanto a un número variable de carros.

En total se han de ejecutar 9894 operaciones, que con sus tiempos de entrada y salida de cada máquina, conformarán el plan de producción. Se muestra como ejemplo la referencia 17 en la Figura 5:

En la demanda **D** cuenta con 3 UFAs, cada una de ellas representada en un color. Comienzan en la máquina m1 para, inmediatamente al terminar, pasar a m21. Nótese como cada UFA, al pasar a m14, se convierte en 3 carros que han de empezar y acabar el resto de los procesos simultáneamente a partir de entonces. De nuevo, obsérvese la carencia de tiempos de espera entre operaciones y la coexistencia de distintas unidades de flujo en una misma tarea.

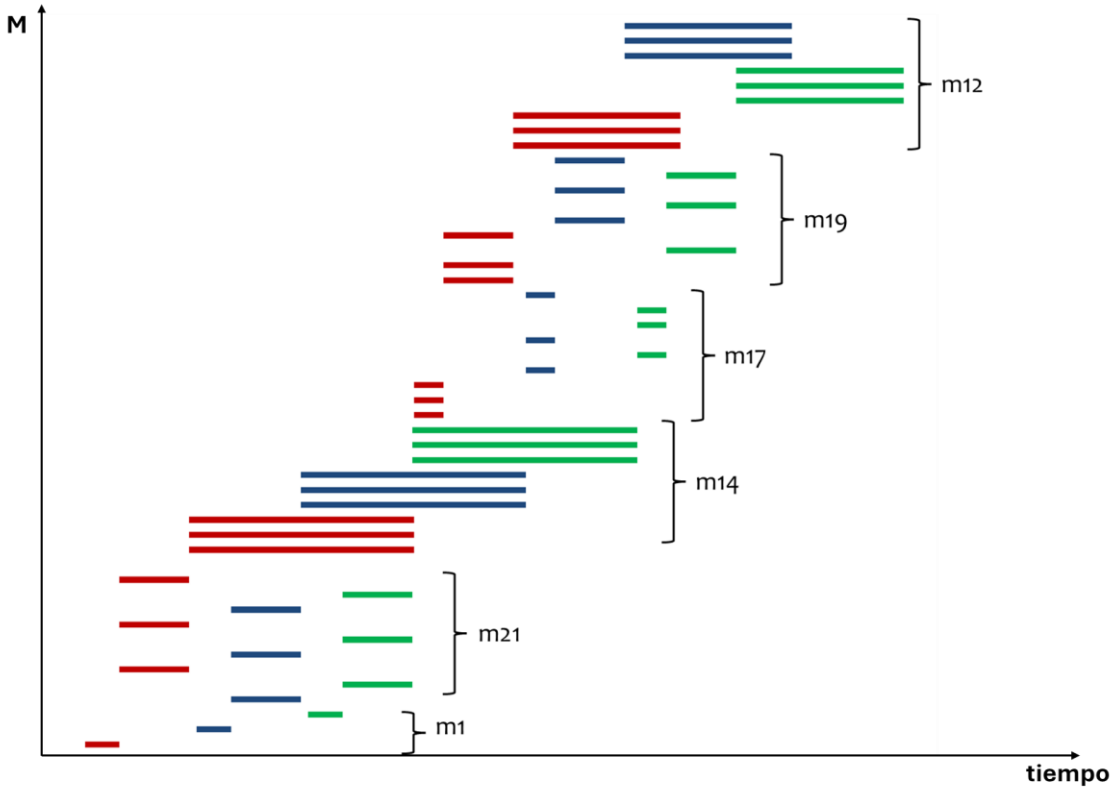

Figura 5 – Diagrama de Gantt de la producción de la referencia 17 hasta llegar al túnel de enfriamiento.
Fuente: Elaboración propia (2024)

3.2 EL ALGORITMO

La función objetivo a minimizar será el tiempo total de proceso (*makespan*, en inglés). Este se medirá como la diferencia entre el momento en que finaliza la última operación, y el momento en que comienza la primera, abarcando así el período empleado para completar todas las tareas de la demanda.

La heurística utilizada no se sustenta en ninguna regla generalista —aunque algunos recursos serán probados en forma de hipótesis, como se describirá posteriormente—, sino que está estrechamente basada en el conocimiento integral de la planta y su funcionamiento. En concreto, en el de su cuello de botella: el túnel de enfriamiento rápido (*m12)* , el punto en el que todos los productos confluyen tal y como ilustra la Figura 6.

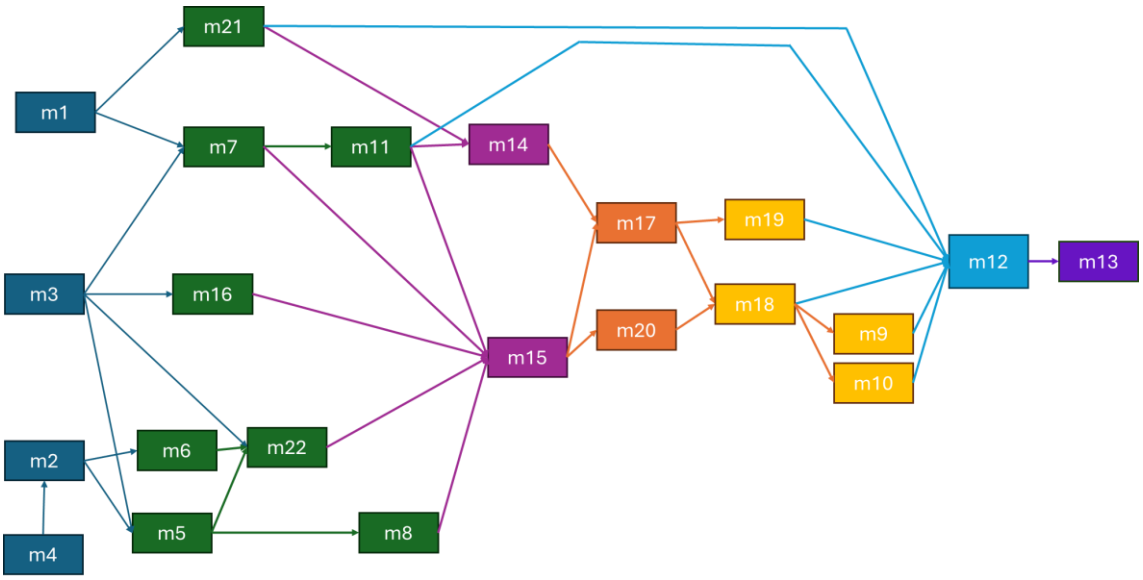

Figura 6 – Diagrama de flujo de procesos. Fuente: Elaboración propia (2024)

Las líneas generales en las que fluyen los productos son el segundo punto clave a abordar. Aunque, tal y como se observa, existen múltiples posibilidades en cuanto al orden de precedencia de las máquinas, se advierten dos flujos principales a los que apodaremos (i) Moitec —nombre de la maquinaria utilizada en gran parte de sus productos— y (ii) Artesana. Los productos de la primera suelen amasarse en *m1*, mientras que los de la segunda lo hacen

en *m2* y *m3*. Las operaciones que siguen suelen ser similares, aunque existe variabilidad entre distintas referencias. Ambas líneas presentan características que las diferencian. Los productos de Moitec suelen tener tiempos de proceso menores, y se fabrican en volúmenes muy superiores; en Artesana los procesos son en general más lentos y la producción es menor, pero además existe una mayor heterogeneidad entre los productos, tanto en tiempos como en las máquinas requeridas.

La técnica heurística a confeccionar pretende por lo tanto explotar los rasgos que diferencian a estos dos grandes grupos de productos, junto con el conocimiento del cuello de botella del sistema. A grandes rasgos, los pasos a ejecutar son:

1. Separar las tareas demandadas en (i) Moitec o (ii) Artesana:

$$D_M = \{i \in D \mid i\ pertenece\ a\ Moitec\} \quad \text{[Ec. 1]}$$

$$D_A = \{i \in D \mid i\ pertenece\ a\ Artesana\} \quad \text{[Ec. 2]}$$

$$D_M \cap D_A = \emptyset,\ D_M \cup D_A = D$$

2. Maximizar la ocupación del cuello de botella con tareas de Moitec (m12):

$$\max \left(\frac{\sum_{i \in D_M} t_{proceso}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Ec. 3]}$$

$t_{proceso}(i, m12)$ →tiempo que pasa la tarea i en el túnel (m12)

T_{total}→ duración total de la producción semanal

C_{12}→ capacidad del túnel. Aquí, ($C_{12} = 24$)

3. Ocupar los huecos restantes con tareas de Artesana:

$$\max \left(\frac{\sum_{i \in D_A} t_{proceso}(i,m12)}{T_{total} \times C_{12}}\right) \quad \text{[Ec. 4]}$$

El primer paso es muy sencillo, pues la distinción viene ya dada en los datos facilitados por la empresa, y solo es necesario generar tantas tareas como estipule el pedido.

La justificación del segundo es la siguiente: al ser tareas relativamente homogéneas, no es tan complejo hacer que encajen entre sí —a diferencia de lo que ocurriría si se incluyeran las tareas de Artesana. Se pretende por lo tanto saturar —hasta cierto punto, como se detallará después— el túnel de enfriamiento rápido. Inevitablemente, quedarán huecos libres —en nuestra adaptación, máquinas de capacidad unitaria libres— debido a la rigidez del NWJSP, que no permite demoras entre operaciones.

El tercer punto pretende explotar los huecos no cubiertos por el paso anterior. Además, se beneficia de la mayor variabilidad en tiempos de proceso que tiene Artesana. Por último, al tener un volumen de producción significantemente menor —180 tareas de Artesana frente a 653 de Moitec en el caso de la demanda **D** dada—, los huecos ya mencionados deberían ser suficientes para cubrir la totalidad de la producción.

El algoritmo por lo tanto tiene también un no menospreciable soporte en la filosofía Lean, en concreto en la metodología *Pull* (tirar, en contraposición a *Push*, empujar). Un *Push* consistiría en amasar a la máxima cadencia que permitieran las amasadoras, lo que daría lugar a esperas—inaceptables en nuestro proceso— en las puertas del túnel de enfriamiento. Mediante el *Pull*, se produce sólo la cantidad que el cuello de botella puede asimilar. Además, al ser la única máquina presente en todas las tareas, ninguna referencia queda excluida por lo que no son necesarios mecanismos de reparación o heurísticas adicionales para formar la solución final.

El bucle WHILE utilizado en el segundo paso del algoritmo —es decir, en la saturación del túnel de enfriamiento rápido con tareas de Moitec— es el siguiente:

```
0.sin_asignar←tareas
1. WHILE sin_asignar ≠ ∅
2.     Inicializa temp_sin_asignar ← []
3.     FOR tarea ∈ sin_asignar DO
4.         IF tarea ∈ moitec
5.             minutos_tunel ← EncuentraTiempo(tarea,m12)
6.             posible1←TunelDisponible(minutos_tunel,m12,t)
7.             IF NOT posible1
8.                 temp_sin_asignar.append(tarea)
9.             ELSE
10.                posible2←MaquinasDisponibles(tarea,M,t)
11.                IF NOT posible2
12.                    temp_ sin_asignar.append(tarea)
13.    sin_asignar ← temp_sin_asignar
14.    t←t+incremento
15. END WHILE
```

Todas las tareas se marcan como aún no asignadas, y el bucle iterará hasta que la lista no quede vacía. Se inicializa una lista vacía en la que se guardarán aquellas tareas que no han podido ser asignadas en la presente iteración.

En la línea 3 se itera sobre las tareas no asignadas, filtrando posteriormente aquellas que pertenecen a la Línea Moitec. Se obtiene el tiempo requerido por la tarea presente en el túnel, y en la línea 6 se comprueba la disponibilidad de éste durante dicho intervalo. Se comprueba únicamente la disponibilidad del túnel ya que en la mayoría de los casos es suficiente para descartar la tarea entera. Al no tener que iterar sobre todas las operaciones de cada tarea y sobre sus máquinas correspondientes, se logra ahorrar en tiempo de computación. La función TunelDisponible devolverá TRUE si se puede asignar el túnel a la tarea durante el tiempo de proceso necesario.

Si no es así, la tarea se añade a las no asignadas para volver a comprobar durante la siguiente iteración. Por el contrario, si el túnel está libre, la función MaquinasDisponibles comprueba que también el resto de máquinas implicadas en la tarea lo estén. De nuevo, si algún intervalo no fuera compatible con la disponibilidad de las máquinas, la tarea sería añadida a temp_sin_asignar.

MaquinasDisponibles también asigna las operaciones de la tarea en las máquinas correspondientes en caso de ser posible. La nueva lista de tareas no asignadas es actualizada, y antes de repetir el bucle se incrementa el tiempo presente *t* para la siguiente iteración.

Este mismo bucle es también empleado para posteriormente asignar las tareas de Artesana en los huecos restantes, sustituyendo la línea 4 por: IF tarea ∈ artesana. Así se logra simplificar la implementación, aunque ofreciendo cierta flexibilidad: los bucles pueden tener distintos incrementos o incluir distintas alteraciones como la aleatoriedad a la hora de iterar sobre las tareas.

3.3 HIPÓTESIS A VALIDAR

En esta sección se expondrán las hipótesis bajo las que se concibe el algoritmo, así como mejoras potenciales para mejorar su efectividad. Serán probadas mediante su implementación en el algoritmo básico, documentando los resultados en el capítulo subsiguiente.

3.3.1. Hipótesis I: Saturar el túnel de enfriamiento primero con Moitec y posteriormente Artesana reduce el tiempo total de proceso

Se ha asumido al plantear el algoritmo, y su falta de corroboración por parte de los resultados evidenciaría la necesidad de cambiar el enfoque.

3.3.2 Hipótesis II: Al saturar el túnel con Moitec, dejar *z* huecos libres reduce el tiempo total de proceso.

Optimizaría la función objetivo en el caso de que los huecos en el túnel de congelación dejados por Moitec no resultaran suficientes para acomodar la demanda de Artesana. Plantea por lo tanto reducir la disponibilidad del túnel durante la primera fase a (24-z) huecos —o máquinas unitarias—, que posteriormente serían liberados para Artesana.

3.3.3 Hipótesis III: Al saturar el túnel con Moitec, iterar con incrementos de tiempo *t* menores reduce el tiempo total de proceso.

La tercera hipótesis sostiene que disminuir los saltos en los que se recorre el tiempo durante la primera fase del algoritmo puede proporcionar un acoplamiento entre distintas tareas más ajustado, dejando menos pequeños huecos improductivos entre operaciones.

3.3.4 Hipótesis IV: Empezar la jornada con los productos que tardan menos —por tiempos de proceso— en llegar al cuello de botella reduce el tiempo total de proceso.

Se sustenta en el hecho de que una pequeña fracción del pedido está comprometida por productos que no son horneados. Esto puede suponer una gran ventaja, ya que al comenzar la jornada de trabajo, su tiempo de proceso entre el amasado y su paso por el túnel es mucho menor al del resto. Así, se reduce el tiempo que el cuello de botella está vacío, aumentando su utilización

3.3.5 Hipótesis V: Introducir aleatoriedad en el orden en el que se itera sobre las tareas puede otorgar mejoras significativas respecto a un algoritmo determinista.

Reconoce que el orden en el que algoritmo recorre las tareas sin asignar no es necesariamente el óptimo. Se ha de comprobar si recorrerlas en un orden aleatorio produce mejoras significativas al ejecutar el algoritmo un número suficiente de veces. Asimismo, conviene considerar si el sustancial aumento del tiempo de ejecución del programa se justifica por las mejoras observadas.

3.4 CONCLUSIONES

A lo largo de este capítulo se ha abordado el modelado de la planta panificadora como un Taller de Trabajo, conformado por tareas, operaciones y máquinas. La planificación de la planta, con sus 22 máquinas que desempeñarán 9894 operaciones, plantea un desafío significativo.

Se ha empleado un enfoque heurístico, basado en la asignación de tareas en dos etapas. Mediante la división de la demanda entre los productos Moitec y Artesana, se pretende mejorar la eficiencia de la fábrica. El algoritmo incorpora un extenso conocimiento de la planta, junto a técnicas Lean y de cuellos de botella.

Finalmente, cinco hipótesis específicas han sido formuladas. Están orientadas a reducir la función objetivo, eso es, el tiempo total de proceso. Serán verificadas en el próximo capítulo mediante la simulación del Taller de Trabajo, potencialmente contribuyendo a la eficacia de la metodología propuesta.

Capítulo 4. RESULTADO DE LAS HIPÓTESIS Y MODELO FINAL

A continuación, se recopilarán los resultados obtenidos por las distintas versiones del algoritmo heurístico detallado en el capítulo anterior. Dichas versiones derivan de las cinco hipótesis planteadas previamente. Finalmente, siempre que el tiempo de ejecución resulte razonable, se escogerá la variante que otorgue la máxima optimización de la función objetivo: aquella con menor tiempo total de procesos

La marca a batir en la función objetivo es de **8124** minutos; este es el tiempo asignado por la planificación actual de la empresa para la confección del pedido. En caso de disminuir el tiempo de producción, el algoritmo tendrá un doble beneficio: (i) la automatización de la planificación —actualmente realizada manualmente—, y (ii) una mayor eficiencia de la planta.

En cuanto a la metodología a seguir, se realizarán 15 ejecuciones de las variantes en las que el orden de la lista de tareas es aleatorio. En los resultados de las tablas de los siguientes apartados, aparecerán dos cifras: en primer lugar el promedio, y debajo el mejor caso hallado en las 15 ejecuciones.

Cada una de las cinco hipótesis será simulada y discutida en los apartados 4.1-4.5, a excepción de la Hipótesis V: "*Introducir aleatoriedad en el orden en el que se itera sobre las tareas puede otorgar mejoras significativas respecto a un algoritmo determinista*". La aleatoriedad será implementada en las simulaciones de las Hipótesis I-IV para observar cómo la variabilidad en el orden de iteración puede influir en los resultados del algoritmo. Las variantes simuladas en las secciones 4.1-4.4 contarán con una variante equivalente que incluya la aleatoriedad. De este modo, en el apartado 4.5 se recogerán las observaciones de los apartados anteriores con el fin de evaluar la validez de la Hipótesis V.

Se ha partido de base con incrementos de tiempo t=15 minutos. Dados dichos intervalos, los tiempos de ejecución no presentan diferencias significativas entre distintas variantes, por lo que no han sido recogidos en las tablas. Los tiempos sí se señalan en las variantes del apartado 4.3, ya que varía *t*.

4.1 ASIGNACIÓN EN DOS FASES

Hipótesis I*: "Saturar el túnel de enfriamiento primero con Moitec y posteriormente con Artesana reduce el tiempo total de proceso"*.

Tanto en las columnas con aleatoriedad como en las deterministas —eso es, usando la lista con el orden predeterminado del pedido—, se observa que la asignación de las tareas en dos fases ofrece menores tiempos totales de proceso.

Asignar en dos fases	Sí	No	Sí	No
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	0	0	0
Orden de tareas aleatorio	No	No	Sí	Sí
Duración de la jornada (minutos)	**9939.5**	10196.74	**9943,37 / 9866,85**	10111,73 / 10008.53

Tabla 5 – Resultados de la asignación de Moitec y Artesana en distintas fases.
Fuente: Elaboración propia (2024)

El caso determinista con la separación tiene una duración 4h 17min menor respecto a su no implementación. Los casos con aleatoriedad señalan similarmente como el mejor de los casos con separación es 2h 22min más rápido que el mejor de los casos con fase única.

Con estos contundentes resultados en mente, y aún lejos de la marca de 8124 minutos, las siguientes hipótesis serán probadas asumiendo la veracidad de la hipótesis presente. Por lo tanto, se procederá siempre a separar la asignación de Moitec y Artesana en dos fases.

4.2 COMENZAR CON PRODUCTOS SIN HORNEADO

Hipótesis II: *"Empezar la jornada con los productos que tardan menos —por tiempos de proceso— en llegar al cuello de botella reduce el tiempo total de proceso"*.

Los productos sin horneado presentan los menores tiempos de proceso previos al túnel de enfriamiento rápido. Forzar la evaluación en primer lugar de los productos que no necesitan horneado no ha arrojado los resultados positivos esperados, visibles en la Tabla 6. En el caso determinista ha supuesto un retraso de 1h 27min, y en el aleatorio de 31.5 min.

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	Sí	No	Sí	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	0	0	0
Orden de tareas aleatorio	No	No	Sí	Sí
Duración de la jornada (minutos)	10026.58	**9939,5**	9958.85 / 9921.63	**9898.85 / 9890.13**

Tabla 6 – Resultados de priorizar la asignación de productos sin horneado.
Fuente: Elaboración propia (2024)

Consecuentemente, no se implementará esta heurística en las versiones futuras, de tal forma que no se forzará al algoritmo a considerar en primer lugar dichos productos.

Cabe notar como no sólo los mejores casos, sino también los promedios de los casos aleatorios muestran que el orden predeterminado del pedido ofrece resultados por debajo de la media.

4.3 VARIACIONES DE LOS INCREMENTOS DE TIEMPO

Hipótesis III*: "Al saturar el túnel con Moitec, iterar con incrementos de tiempo t menores reduce el tiempo total de proceso."*

Con el objetivo de mejorar el acoplado entre tareas reduciendo huecos innecesarios, se observará también el aumento de tiempo de ejecución del algoritmo. Dicho aumento es causado por el recorrido del tiempo en intervalos menores, aumentando el número de potenciales asignaciones calculadas por el algoritmo. A continuación, se bajarán los incrementos de tiempo de los 15 minutos originales a 3, 1.5, 1 y 0.5 minutos.

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	3	1,5	1	0,5
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	0	0	0	0
Orden de tareas aleatorio	No	No	No	No	No
Duración de la jornada (minutos)	9939,5	7401,5	7308,5	7213,55	7513,05
Tiempo ejecución (segundos)	40	100	206	273	553

Tabla 7 – Resultados de reducir los incrementos de tiempo t, con orden de tareas predeterminado.
Fuente: Elaboración propia (2024)

En la Tabla 7 se observa como en el caso determinista, la duración del tiempo total de proceso disminuye conforme lo hacen los incrementos. Sin embargo, se observa cierto repunte en el caso de t=0.5. Dicha tendencia se refleja en la Figura 7.

Al introducir aleatoriedad y repetir la simulación 15 veces (Tabla 8), se esclarece la tendencia esperada. El mejor de los casos se da con el mínimo incremento de tiempo *t* probado. En los mejores casos, la variante de t=0.5 es 42h 30min más rápida que la de t=15. Igualmente, si se usan los promedios la ventaja alcanza las 46h 51min.

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	3	1,5	1	0,5
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	0	0	0	0
Orden de tareas aleatorio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Duración de la jornada (minutos)	9898,85 / 9890,13	7545,3 / 7405,8	7104,05 / 7095,58	7208,14 / 7160,5	7087,5 / 6979,8
Tiempo ejecución (segundos)	37	101	176	306	541

Tabla 8 – Resultados de reducir los incrementos de tiempo t, con orden de tareas aleatorio.
Fuente: Elaboración propia (2024)

Las mejoras obtenidas son sustanciales respecto a la duración que reportaba la planta previa al estudio. Aunque se aprecia un aumento en la función objetivo en la variante t=1, este puede deberse a un no suficiente número de ejecuciones de todas las variantes. Aun así, la prueba concluye que la hipótesis es correcta.

En cuanto a los tiempo de ejecución, existen diferencias significativas, siendo la diferencia entre los casos más extremos de 10.5 minutos en promedio. Sin embargo, teniendo en cuenta que los pedidos se planifican una vez a la semana, resultan tiempos de ejecución razonables.

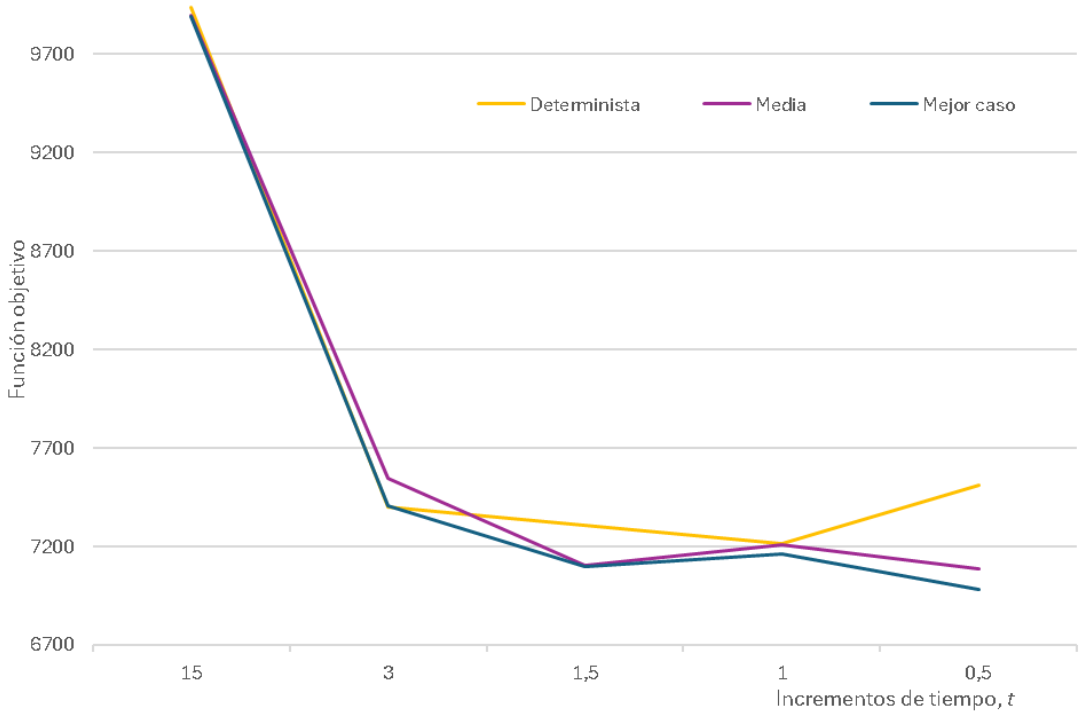

Figura 7 – Comparación de incrementos de tiempo t. Fuente: Elaboración propia (2024)

4.4 LIBERACIÓN DE HUECOS EN EL TÚNEL DE ENFRIAMIENTO

Hipótesis IV*: "Al saturar el túnel con Moitec, dejar z huecos libres reduce el tiempo total de proceso."*

Se han ensayado versiones con hasta 8 huecos. Los resultados de las Tablas 9.1 y 9.2 ilustran como, *ceteris paribus*, forzar la liberación de huecos en el cuello de botella durante la primera fase de asignación de productos Moitec no mejora la función objetivo.

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	1	2	3	4
Orden de tareas aleatorio	No	No	No	No	No
Duración de la jornada (minutos)	9939,5	10071,58	9954,5	10131,58	10146,58

Tabla 9.1– Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas predeterminado. Fuente: Elaboración propia (2024)

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	5	6	7	8
Orden de tareas aleatorio	No	No	No	No
Duración de la jornada (minutos)	10101,41	10086,41	10241,74	10226,74

Tabla 9.1– Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas predeterminado. Fuente: Elaboración propia (2024)

Las conclusiones de la versión determinista se derivan también de la versión con ordenamiento aleatorio de tareas, y así lo reflejan las Tablas 10.1 y 10.2.

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0	1	2	3	4
Orden de tareas aleatorio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Duración de la jornada (minutos)	9898,85 / 9890,13	10046,08 / 9948,22	10027,49 / 9901,1	10083,63 / 9951,63	10078,80 / 9951,63

Tabla 10.1 - Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas aleatorio. Fuente: Elaboración propia (2024)

Asignar en dos fases	Sí	Sí	Sí	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No	No	No	No
Incrementos de tiempo *t*	15	15	15	15
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	5	6	7	8
Orden de tareas aleatorio	Sí	Sí	Sí	Sí
Duración de la jornada (minutos)	10079,51 / 9978,58	10089,11 / 9990,8	10060,58 / 9990,56	10058,48 / 9935,18

Tabla 10.2 - Resultados de dejar huecos libres en el túnel durante la asignación de Moitec, con orden de tareas aleatorio. Fuente: Elaboración propia (2024)

La hipótesis queda por lo tanto descartada, y la heurística no se implementará en el modelo final del algoritmo.

4.5 ORDENADO ALEATORIO DE LAS TAREAS

Hipótesis V*: "Introducir aleatoriedad en el orden en el que se itera sobre las tareas puede otorgar mejoras significativas respecto a un algoritmo determinista."*

Tal y como se ha observado al comprobar las anteriores hipótesis, la ejecución repetida de las variantes en las que se implementa la aleatoriedad ofrece mejores resultados. Y no sólo en promedios, sino especialmente tomando los *mejores casos*, que han superado los resultados del orden predeterminado en todas las variantes simuladas en los apartados 4.1-4.4.

Esto sin embargo implica el tener que ejecutar el algoritmo15 veces —o más, si así se desea—. Aunque esto acarrea consecuencias negativas en cuanto a tiempos de ejecución, se considera que éstas se ven compensadas por la mejor utilidad conseguida.

Es así como se optará por ordenar aleatoriamente las tareas a comprobar durante cada iteración del algoritmo en el modelo final.

4.6 MODELO FINAL

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, el modelo siguiente corresponde a la última variante del apartado 4.3:

Asignar en dos fases	Sí
Comenzar con productos sin horneado	No
Incrementos de tiempo *t*	0,5
Huecos libres en túnel de enfriamiento, *z*	0
Orden de tareas aleatorio	Sí

Tabla 11 – Modelo con las especificaciones finales. Fuente: Elaboración propia (2024)

4.7 CONCLUSIONES

Tras simular diferentes variantes de acuerdo a las hipótesis planteadas en el capítulo anterior, se concluye que:

i. Resulta beneficioso asignar primero los productos Moitec y posteriormente Artesana.
ii. No es beneficioso asignar primero los productos sin horneado.
iii. Menores incrementos de tiempo *t* ofrecen mejores resultados, a cambio de mayores —pero asumibles— tiempos de ejecución.
iv. No es beneficioso forzar *z* huecos en el túnel de enfriamiento durante la asignación de tareas Moitec
v. Introducir aleatoriedad a la hora de evaluar las tareas es beneficioso, especialmente si se ejecuta el algoritmo múltiples veces para obtener una mejor planificación.

Así, tras 15 ejecuciones, se ha encontrado una solución con una duración de 6979.8 minutos de proceso. Supone un **ahorro de** 1144.2 minutos, o aproximadamente **19 horas**. En el siguiente capítulo se estudiarán los beneficios que esto puede ofrecer a la empresa propietaria de la planta.

Capítulo 5. VIABILIDAD ECONÓMICA

En este capítulo se evaluará cuantitativamente el beneficio que la metodología presentada puede aportar para la planta panificadora. La implantación del algoritmo supone a grandes rasgos un ahorro de tiempo total de proceso: se asume que el volumen del producción no varía. Fabricar la misma cantidad de pan en menos tiempos permite ahorrar en horas mano de obra y maquinaria, como se detallará en los siguientes apartados.

En el capítulo anterior, la confección del modelo final permitió rebajar el tiempo necesario para producir el pedido de los 8124 minutos a los 6979.8 minutos. Esto supone una reducción de 1144.2 minutos. A continuación, se estudiará tanto el beneficio como el coste adicional propiciado por el proyecto. Mediante ellos, se calculará la potencial rentabilidad de la propuesta en el medio plazo, 6 meses tras la implantación

5.1 AHORRO: REDUCCIÓN DE COSTES TRAS LA IMPLANTACIÓN

A la hora de calcular el beneficio fruto del menor tiempo de proceso, se han de considerar dos frentes: los salarios de los empleados involucrados en la producción, y el consumo energético de las máquinas pertinentes.

5.1.1 SUELDOS

En el momento de la elaboración del proyecto, el convenio colectivo del sector de Panadería de la provincia de Zaragoza, donde se encuentra la planta, sigue en proceso de renegociación. Lo lleva así desde 2022, último año previsto por el documento, que establece salarios inferiores al SMI actual.

Es por ello que, para el cálculo de los costes que el algoritmo permite ahorrar, se utilizarán los datos de contabilidad interna tratados por la empresa. Existen tres categorías de trabajadores dentro del área de producción: encargado, oficial y peón. Los costes estimados en euros por hora son los siguientes:

Coste de mano de obra, €/h	
Encargado	16,27
Oficial	13,33
Peón	10,7

Tabla 12 – Costes de mano de obra, por hora. Fuente: Novapan SL (2024)

En la semana correspondiente al pedido planificado en el caso presente, se emplearon 142.85h de encargados, 233.47h de oficiales y 1283.45h de peones. Así, multiplicando las horas de trabajo por sus correspondientes costes de mano de obra, los costes en salarios del caso base son:

	Horas totales	Coste por hora	Coste Salario semana
Encargado	142,85	16,27	2.324,17 €
Oficial	233,47	13,33	3.112,11 €
Peón	1283,45	10,7	13.732,91 €
		TOTAL:	**19.169,19 €**

Tabla 13 – Costes de mano de obra. Fuente: Novapan SL(2024)

Dichas horas corresponden a 8124 minutos semanales de producción. Lograr terminar la producción en 6979.8 minutos supone una reducción del 14.08%. Suponiendo que el número de horas de encargados, oficiales y peones no se ve alterado por la nueva planificación, la implementación del algoritmo heurístico podría ahorrar a la empresa **2.699,83€** semanales únicamente en sueldos.

5.1.2 ENERGÍA

De manera similar, pero con ciertos matices, la reducción del tiempo total de proceso da lugar a un menor consumo de energía por parte de la maquinaria. Aunque bien es cierto que la diferencia de tiempo entre la primera y última tarea disminuye, el número de operaciones ejecutadas por cada máquina es idéntico.

Es por ello que gran parte de las máquinas —amasadoras, divisoras, hornos — no verán menguados sus tiempos de operación, no generando por lo tanto ningún tipo de ahorro. Sin embargo, hay dos máquinas —con consumos energéticos intensivos— a las que no aplica este razonamiento: las fermentadoras y el túnel de enfriamiento rápido.

Estas máquinas se mantienen encendidas constantemente desde el arranque de la producción hasta el cierre, al acabar el pedido semanal. Su consumo se supone, por ende, independiente de su grado de ocupación; al aumentar su ocupación, el coste por tarea disminuye, proporcionando un ahorro real por semana.

Según los datos proporcionados por la empresa, el consumo de las fermentadoras y túnel de congelación es el recogido en la Tabla 14. Multiplicando la columna 'Coste de carro por minuto' por la capacidad en carros de la respectiva máquina, se obtiene el coste de mantener la máquina en funcionamiento durante un minuto.

Máquina	Coste de carro por minuto	Coste de máquina por minuto
Fermentadora Moitec	0,02234715 €	0,73745605 €
Fermentadora Artesana	0,00687943 €	0,12382973 €
Túnel de enfriamiento rápido	0,00627476 €	0,15059416 €

Tabla 14 – Costes de consumo de maquinaria, por minuto. Fuente: Novapan SL(2024)

Los 1144.2 minutos ahorrados por el algoritmo son entonces multiplicados por los costes de cada máquina por minuto, puesto que éstas operarán durante menos tiempo que originalmente. Los resultados se recogen en la Tabla 15.

Máquina	Coste de carro por minuto	Coste de máquina por minuto	Ahorro semanal
Fermentadora Moitec	0,02234715 €	0,73745605 €	843,80 €
Fermentadora Artesana	0,00687943 €	0,12382973 €	141,69 €
Túnel de enfriamiento rápido	0,00627476 €	0,15059416 €	172,31 €
		TOTAL:	**1.157,79 €**

Tabla 15 – Costes de consumo de maquinaria. Fuente: Elaboración propia (2024)

Tal y como se indica en la tabla, el ahorro energético semanal alcanza **los 1.157,79€**, menor al ahorro en salarios, pero en el mismo orden de magnitud.

RESULTADO

Sumando ambas cifras finales, la estimación del ahorro semanal de la planificación presente —respecto a la original— es de **3.857,62€**.

5.2 GASTOS: COSTES DE IMPLANTACIÓN

Para llevar a cabo dicha mejoría en una planta similar, sería necesario incurrir en costes que abarcan desde el diseño de la heurística por parte de un ingeniero, a su mantenimiento y actualización a lo largo del tiempo. Dichos gastos serán estudiados en los apartados 5.2.1-5.2.4

Algunos costes como el diseño del algoritmo son puntuales, realizados sólo al inicio de la inversión. Otros como las licencias de los programas informáticos devienen periódicamente. En un horizonte temporal de seis meses, los costes esperables son:

5.2.1 SERVICIOS DE INGENIERÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN

Un ingeniero especializado en organización industrial deberá conocer en profundidad la planta panificadora; visitándola y entendiendo el funcionamiento de cada una de sus

máquinas, sus interdependencias, cuellos de botella y otros factores limitantes que hacen única su casuística. Posteriormente, deberá elaborar hipótesis para optimizar la planificación, modelar la planta y crear el algoritmo heurístico.

Se estima que todo ello tomará 120 horas de trabajo a un experto familiarizado con el estado del arte de la materia. El convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería establece el salario mínimo de un técnico superior en 28.664,12€ anuales, correspondientes a 1792 horas de trabajo anuales[31], a lo que habría que añadir las cotizaciones a la seguridad social.

Sin embargo, se considerará la contratación de un profesional independiente, ya que, con jornadas semanales de 40 horas, el proyecto debería implementarse en tan solo tres semanas. A un coste de 50€ la hora, con un IVA del 21% por los servicios prestados, la factura del profesional asciende a **7.260€**.

5.2.2 LICENCIA DE PROGRAMAS

Para realizar un proyecto similar, es necesario contar los con programas de Office365 —principalmente Microsoft Excel— y con un editor de código que soporte Python. El último es gratuito —en el caso presente se ha empleado Sublime Text—, mientras que una subscripción **anual** de Office365 tiene un coste de **11,70€**.

5.2.3 MANTENIMIENTO DEL ALGORITMO

Se estima que un ingeniero de la empresa deberá invertir en promedio dos horas semanales —adicional a las ya trabajadas— para mantener el algoritmo actualizado: añadiendo y retirando de la base de datos según se demande, o actualizando las máquinas disponibles y el modo en que funcionan. Utilizando los tipos del convenio señalados en el apartado 5.2.1, dichas horas se traducen en un coste de **41,22€ semanales**.

[31] Dirección General de Trabajo, (2023)

5.2.4 AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO INFORMÁTICO

El equipo informático utilizado por el ingeniero durante la implantación será un ordenador portátil. Uno de prestaciones similares al utilizado en el proyecto presente, con 8GB de RAM, tiene un precio aproximado de 700€. Con una vida útil de 4 años, la amortización —suponiéndose lineal— será de 175€ anuales. De nuevo, estimando que las 120 horas de trabajo se desempeñan a lo largo de tres semanas, el coste total será de **10,10€**. Se devendrán 3,37€ cada una de las 3 semanas que dure la implementación, previas a la puesta en marcha de la planificación.

5.3 RESULTADOS FINALES

En la Figura 8, se han representado gráficamente las progresiones temporales de los ahorros y gastos indicados en los apartados anteriores. Para ello, se ha elaborado la Tabla 16, unificando todos los importes como (i) iniciales, o (ii) equivalentes semanales. Tanto los gastos de implementación como la amortización del equipo informático se han contabilizado en la primera semana de operaciones, pues se asume que se retribuirá al profesional al terminar su tercera y última semana de trabajo.

AHORRO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Mano de Obra	2.699,83 €	semanal	2.699,83 €
Energía	1.157,79 €	semanal	1.157,79 €
		TOTAL SEMANAL	**3.857,62 €**
GASTO	Importe	Frecuencia	Frecuencia semanal eq.
Implementación	7.260,00 €	única	-
Licencias	11,70 €	anual	0,23 €
Mantenimiento	42,22 €	semanal	42,22 €
Amortización del equipo	3,37 €	semanal*	-
		TOTAL SEMANAL	**42,45 €**
		TOTAL INICIAL	**7.270,10 €**

*: Durante 3 semanas, previas a la puesta en marcha de la planificación

Tabla 16 – Ahorros y gastos derivados de la implementación. Fuente: Elaboración propia (2024)

Antes de alcanzar la segunda semana ya se sobrepasa el punto muerto de la inversión, tal y como ilustra la Figura 8 con una línea discontinua roja. En este punto, los ahorros producidos alcanzan e igualan los gastos, haciendo el beneficio hasta la fecha nulo. Con la inversión inicial ya superada, cada semana se suman 3.815,17€ al beneficio, que acumulado durante **medio año** (26 semanas) alcanza la cifra de **91.924,45€.**

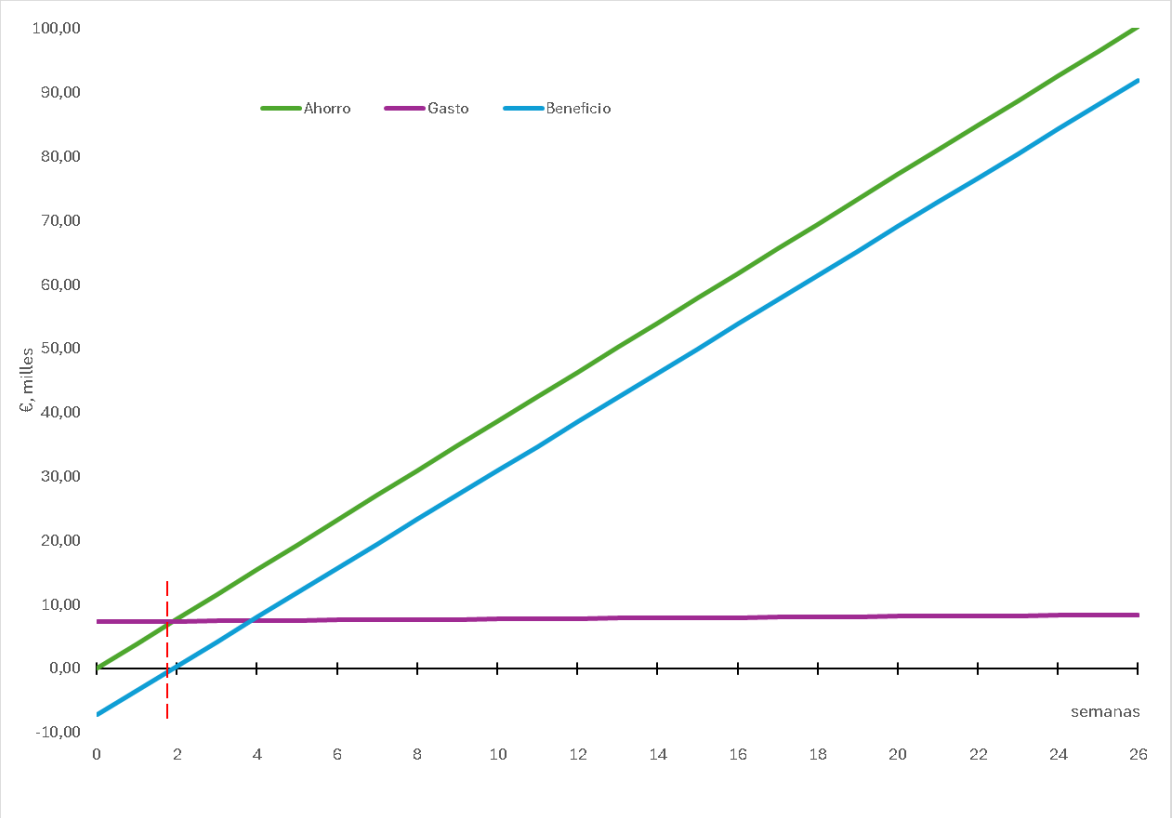

Figura 8 –Gráfico de punto muerto de la inversión. Fuente: Elaboración propia (2024)

5.4 CONCLUSIONES

La reducción de 8124 a 6979.8 minutos de tiempo total de proceso ha resultado ser muy beneficiosa, en el corto y largo plazo. El ahorro combinado en sueldos y energía, 3.857,62€ semanales, es muy superior a los bajos costes que supone mantener la mejora operativa, tan solo 42.45€ semanales. Este gran margen permite afrontar la inversión de 7.270,10€, recuperándola en la segunda semana tras la implantación. Tras seis meses, los beneficios acumulados son de 91.924,45€, y al año alcanzan los 191.119,00€.

Cabe notar como se ha asumido —por simplicidad— que la planta dejará de operar cada semana al terminar de satisfacer la demanda establecida. Sin embargo, podría considerarse aumentar el volumen de producción manteniendo fijas las horas de trabajo. Esto permitiría bajar los costes unitarios, si la empresa fuera capaz de vender la producción adicional en los mercados.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Este capítulo final recopilará las conclusiones alcanzadas durante la realización del proyecto, indicando posteriormente posibles líneas de desarrollo futuro basadas en lo aprendido.

El objetivo principal de este Proyecto de Fin de grado era optimizar la producción de una planta panificadora concreta. Para ello, fue necesaria una exhaustiva revisión del Estado de la Técnica, tras la que fue posible plantear el modelado de la planta y la confección de la herramienta de optimización, para posteriormente validar la rentabilidad económica de su implantación.

El capítulo segundo abordó las numerosas técnicas existentes en el campo de la investigación operativa, escogiendo como enfoque para el proyecto una combinación del Taller de Trabajo, la teoría de cuellos de botella y conceptos del *Lean Management.* También se estableció como función objetivo —en este caso, a minimizar— el tiempo total de proceso, comenzando desde la entrada de la primera operación, hasta el acabado de la última. Las tareas a completar corresponden a la demanda semanal que la fábrica debe satisfacer.

Se seleccionó el Taller de Trabajo por su enfoque general y relativa flexibilidad, permitiendo modelar la planta como un conjunto de tareas, operaciones y máquinas. Sin embargo, fue necesario encontrar variantes alternativas para dos hipótesis que no se cumplían en nuestra casuística:

1. En la planta, una máquina puede procesar varios productos simultáneamente, algo no previsto por el Taller de Trabajo. Además, en máquinas como la fermentadora o el túnel de enfriamiento rápido, las operaciones comienzan y terminan a destiempo —y no en lotes con un tiempo de proceso único— , un aspecto apenas abordado por la literatura académica.

2. Debido a la naturaleza del proceso de fabricación del pan —con grandes diferencias respecto a otros procesos industriales en los que se centra el Estado de la Técnica— resulta esencial respetar sus tiempos de proceso y reposo, fundamentales para mantener la calidad de producto. Estos tipos de Taller de Trabajo, en los que no se permiten esperas intermedias entre operaciones consecutivas, son conocidos como *no-wait Job-Shop Problem.*

Siendo el Taller de Trabajo un problema NP complejo —es decir, no se resuelve en tiempo polinomial—, el solucionado mediante métodos exactos ha sido descartado. Se ha optado por aplicar un algoritmo heurístico, incorporando elementos lógicos que combinan el conocimiento de la planta con el concepto *Pull* tomado del Lean y la explotación de los cuellos de botella. Todo ello se sintetiza en cinco hipótesis:

Hipótesis I: Saturar el túnel de enfriamiento primero con productos del grupo Moitec, y posteriormente de Artesana, reduce el tiempo total de proceso.
Hipótesis II: Al saturar el túnel con Moitec, dejar *z* huecos libres reduce el tiempo total de proceso.
Hipótesis III: Al saturar el túnel con Moitec, iterar con incrementos de tiempo *t* menores reduce el tiempo total de proceso.
Hipótesis IV: Empezar la jornada con los productos que tardan menos —por tiempos de proceso— en llegar al cuello de botella reduce el tiempo total de proceso.
Hipótesis V: Introducir aleatoriedad en el orden en el que se itera sobre las tareas puede otorgar mejoras significativas respecto a un algoritmo determinista.

Tras simular los escenarios pertinentes, se concluyó que las Hipótesis I, III y V eran válidas. En consecuencia, se integraron en el modelo final del algoritmo. Éste logró reducir la función objetivo de 8124 a 6979,8 minutos, un ahorro del 14.08% en el tiempo de proceso. Para obtener dicha solución, se ejecutó el algoritmo —configurado de acuerdo a las hipótesis aceptadas— un total de 15 veces, tomando la iteración con menor tiempo de proceso.

Los 1144,2 minutos que el algoritmo consigue ahorrar al planificar la producción semanal permiten reducir costes tanto en mano de obra empleada, como en el consumo de determinadas máquinas:

1. Cerrar cada semana unas 19 horas antes permite reducir los salarios de peones, oficiales y encargados de la fábrica. Esto supone un ahorro de 2.669,83€ cada semana.
2. La mayoría de las máquinas no disminuyen su consumo energético, pues realizan el mismo número de operaciones. No obstante, tres máquinas con un gran gasto en electricidad, las dos fermentadoras y túnel de enfriamiento rápido, consumen lo mismo independientemente de su grado de ocupación. Aumentando la ocupación —como consecuencia del menor tiempo total de proceso del pedido— se consigue que dichas máquinas estén encendidas menos tiempo, ahorrando semanalmente 1.157,79€.

Acceder a estos beneficios conlleva una gasto relativamente pequeño. La estructura de costes estimados incluye una inversión inicial de 7.270,10€, con un coste semanal adicional de 42,45€ para mantener el algoritmo y programas necesarios en correcto funcionamiento. La inversión inicial se recuperaría por lo tanto al terminar la segunda semana, proporcionando al proyecto de un gran atractivo para empresas que buscan la mejora continua. Tras seis y doce meses, se esperan beneficios acumulados de 91.924,45€ y 191.119,00€ respectivamente.

Debe subrayarse que, además de razonable en términos de rentabilidad, el proyecto ofrece una gran ventaja frente a otras inversiones: el riesgo es muy limitado. Al no demandar de nueva maquinaria, o formación adicional para los trabajadores, se asegura una transición fluida y sin interrupciones. Al entrar la nueva planificación en vigor, los empleados deberán meramente seguir el nuevo orden de las tareas, tal y como trabajan actualmente.

En lo que refiere a futuros desarrollos en la materia, existen varias líneas que se vislumbran como especialmente prometedoras. En primer lugar, siendo la más conservadora y alineada con el proyecto presente, sería probar nuevas hipótesis para mejorar la asignación de tareas.

Por ejemplo, explorar la opción de incentivar la planificación consecutiva de tareas idénticas, potencialmente acoplándose mejor entre sí. También compatible con el enfoque del proyecto sería la incorporación de una heurística de mejora, tratando al algoritmo presente como una heurística constructiva. Esto requeriría de operadores capaces de respetar todas las restricciones de la planta, lo cual incrementa la complejidad en la implantación.

Afrontando el mismo desafío, pero con amplios prospectos de mejora se encuentra la metaheurística: en concreto, los algoritmos genéticos han sido extensamente aplicados al Taller de Trabajo. Sin embargo, casuísticas complejas como la presente requieren de numerosas restricciones adicionales. Encontrar operadores genéticos capaces de explorar los vecindarios de soluciones existentes —como las creadas por el algoritmo heurístico presente— supondrá un notable reto.

Por último, con un enfoque más similar al del algoritmo desarrollado en el proyecto, podría considerarse la introducción de amortiguadores entre operaciones. El tiempo máximo que a cada producto se le permite pasar en cada uno de los amortiguadores sería determinado por el departamento de calidad de la empresa. Ahora mismo se encuentran implícitos en los tiempos de proceso de cada operación. Desasociarlos permitirá una mayor flexibilidad a la hora de planificar, permitiendo explorar nuevas opciones que actualmente se consideran inviables. No obstante, el mayor volumen de información a ejecutar requerirá del uso de técnicas de tratamiento de datos altamente eficientes.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

Ahmadian, Mohammad Mahdi; Khatami, Mostafa; Salehipour, Amir; Cheng, T.C.E. (2021) Four decades of research on the open-shop scheduling problem to minimize the makespan, European Journal of Operational Research, volume 295, Issue 2, pp399-426.

Arisha, A.; Young, P.; El Baradie, M, (2001), Job Shop Scheduling Problem: an Overview, International Conference for Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, pp682–693

Barat, Debarshi .(2013), Job Scheduling with Genetic Algorithm, North Dakota State University

Bożejko, W.; Makuchowski, M. (2011), Solving the no-wait job-shop problem by using genetic algorithm with automatic adjustment., International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 57, pp735–752

Dirección General de Trabajo, Ministerio de Trabajo y Economía Social. (2023), Resolución de 27 de febrero de 2023, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería; oficinas de estudios técnicos; inspección, supervisión y control técnico y de calidad. Boletín Oficial del Estado (BOE), (59), pp36003-36043.

Du, Ding-Zhu; Pardalos, Panos M.; Hu, Xiaodong; Wu, Weili. (2022), "Chapter 8, NP-Hard problems and Approximation Algorithms", Introduction to Combinatorial Optimization, pp123-184.

Ehsaei, M.; Nguyen, D.T. (2017) A New Job Shop Heuristic Algorithm for Machine Scheduling Problems. Journal of Applied Mathematics and Physics, volume 5, pp2172-2182.

Fumagalli, Luca; Macchi, Marco; Negri, Elisa; Polenghi, Adalberto; Sottoriva, Edoardo. (2017), Simulation-supported framework for job shop scheduling with genetic algorithm.

Gamal, Moaaz; Hassanein, Wael. (2013). Solving the Job-Shop Scheduling Problem by Arena Simulation Software. IJEIR.

Gere, W. S. (1966). Heuristics in Job Shop Scheduling. *Management Science*, *13*(3), pp167–190.

Gromicho, Joaquim; Van Hoorn, Jelke; Saldanha-da-Gama, Francisco; Timmer, G. (2012), Solving the job-shop scheduling problem optimally by dynamic programming, Applied Physics Letters.

Manaye, Mengistu. (2019). Line Balancing Techniques for Productivity Improvement, International Journal of Mechanical and Industrial Technology, volume 7, Issue 1, pp89-104

Nailwal, K. K.; Gupta, D.; Jeet, K. (2016), Heuristics for no-wait flow shop scheduling problem. International Journal of Industrial Engineering Computations 7, volume 4, pp671–680.

Ólafsson, Sigurdur. (2006), "Chapter 21 Metaheuristics". Handbooks in Operations Research and Management Science, volume 13, pp633-654 Elsevier

Ongkunaruk, P; Wongsatit, W. (2014), "An ECRS-based line balancing concept: a case study of a frozen chicken producer", Business Process Management Journal, volume 20 No. 5, pp678-692

Özkul, A.O. et al. (2021). An Implementation of Flexible Job Shop Scheduling Problem in a Metal Processing Company, Digital Conversion on the Way to Industry 4.0., Springer

Pan, Jason Chao-Hsien; Huang, Han-Chiang. (2009), A hybrid genetic algorithm for no-wait job shop scheduling problems, Expert Systems with Applications, volume 36, Issue 3, Part 2, pp5800-5806.

Pinedo, Michael L. (2016), “Chapter 7, Job Shops (Deterministic)”. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems (5th Edition), Springer International Publishing

Reginato, Gustavo; Anzanello, Michel José; Kahmann, Alessandro; Schmidt, Lucas. (2016), Mixed assembly line balancing method in scenarios with different mix of products, Gestão & Produção, São Carlos, volume 23, No. 2, pp294-307

Roh, P.; Kunz, A.; Netland, T. (2018), Data-driven detection of moving bottlenecks in multi-variant production lines, International Federation of Automatic Control, volume 51, Issue 11, pp158-163

Roser, Christoph; Lorentzen, Kai; Deuse, Jochen. (2015) Reliable shop floor bottleneck detection for flow lines through process and inventory observations: the bottleneck walk, Logistics Research. volume 8, 7

Roser, Christoph; Nakano, M.; Tanaka, M. (2003), Shifting bottleneck detection, Winter Simulation Conference Proceedings, volume 2, pp1079-1086

Troadec, R.; Regnault, S.; Nestora, S.; Jacolot, P.; Niquet-Léridon, C.; Anton, P.M.; Jouquand, C. (2023). Effect of fermentation conditions of bread dough on the sensory and nutritional properties of French bread. Springer International Publishing

Urban, Wieslaw; Rogowska, Patrycja. (2020), Methodology for bottleneck identification in a production system when implementing TOC, Engineering Management in Production and Services, volume 12, pp74-82

Wang, Yongcai; Zhao, Qianchuan; Zheng, Dazhong. (2005), Bottlenecks in Production Networks: an Overview, Journal Of Systems Science And Systems Engineering , volume 14, No. 3, pp347-363

Xiong, Hegen; Shi, Shuangyuan; Ren, Danni; Hu, Jinjin. (2022) A survey of job shop scheduling problem: The types and models, Computers & Operations Research, volume 142.