



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ADE

Facultad de Administración  
y Dirección de Empresas /UPV

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Facultad de Administración y Dirección de Empresas

Los problemas de satisfacción de restricciones en el  
entorno empresarial: aplicación al caso de asignación de  
defensas y tribunales de Trabajos Fin de Grado para la  
Facultad de Administración y Dirección de Empresas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Administración y Dirección de Empresas

AUTOR/A: Santamarina Puertas, Daniel

Tutor/a: Guijarro Tarradellas, Ester

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# Índice general

---

<b>Índice general</b>	<b>II</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Resumen . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	1
1.3 Motivación . . . . .	2
1.4 Metodología . . . . .	3
1.5 Relación con las asignaturas de la titulación . . . . .	4
1.6 Orden documental . . . . .	5
<b>2 Asignación de recursos en empresas</b>	<b>7</b>
2.1 Conceptos básicos . . . . .	7
2.1.1 Recursos . . . . .	8
2.1.2 Gestión . . . . .	8
2.1.3 Procesos . . . . .	10
2.1.4 Herramientas y metodologías . . . . .	11
2.2 Importancia de la distribución de recursos . . . . .	12
2.2.1 Teoría de ventaja competitiva . . . . .	12
2.2.2 Aplicación de los métodos anteriores en la competitividad empresarial . . . . .	12
2.3 Ventaja competitiva en entornos reales . . . . .	14
2.3.1 Caso práctico Toyota . . . . .	14
2.3.2 Caso práctico Amazon . . . . .	15
2.4 Aplicación de la asignación de recursos en empresas . . . . .	16
2.4.1 Sistemas de planificación de recursos empresariales . . . . .	16
2.4.2 Sostenibilidad y regulación . . . . .	18
2.5 Recursos económicos dedicados a la asignación de recursos . . . . .	19
<b>3 Transformación de la asignación de recursos y los problemas de restricciones en empresas</b>	<b>21</b>
3.1 Contexto . . . . .	21
3.2 Problemas de Satisfacción de Restricciones . . . . .	22
3.2.1 Descripción de métodos . . . . .	23
3.2.2 Aplicación en empresa . . . . .	24
3.2.3 Otras consideraciones . . . . .	25
3.3 Automatización y eficiencia . . . . .	26
3.3.1 Características de los procesos automatizados . . . . .	26
3.3.2 Ventajas del enfoque RPA en las empresas . . . . .	27
3.3.3 Limitaciones del enfoque RPA en las empresas . . . . .	27
3.4 Comunicación y colaboración . . . . .	28
3.4.1 Ventajas de los sistemas de comunicación en las empresas . . . . .	28
3.4.2 Otras consideraciones . . . . .	29
3.5 Procesamiento y análisis de datos . . . . .	29
3.5.1 Descripción de métodos . . . . .	30
3.5.2 Aplicación en empresa . . . . .	31
3.5.3 Otras consideraciones . . . . .	32

3.5.4	Ética de uso . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Propuesta</b>	<b>34</b>
4.1	Análisis del problema . . . . .	34
4.1.1	Oportunidad de innovación . . . . .	34
4.1.2	Naturaleza del problema . . . . .	35
4.1.3	Especificación de requisitos . . . . .	36
4.1.4	Análisis de riesgos . . . . .	37
4.1.5	Presupuesto . . . . .	38
4.2	Diseño de la solución . . . . .	42
4.2.1	Soluciones posibles . . . . .	42
4.2.2	Solución propuesta . . . . .	49
4.2.3	Diseño Detallado . . . . .	49
4.2.4	Ejemplo de resolución del modelo . . . . .	54
4.2.5	Tecnologías utilizadas . . . . .	55
4.3	Implantación . . . . .	55
4.3.1	Instalación del sistema . . . . .	55
4.3.2	Comparación y mejoras . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
5.1	Planteamiento teórico . . . . .	61
5.2	Desarrollo del trabajo . . . . .	61
5.2.1	Aprendizaje personal . . . . .	62
5.2.2	Errores y dificultades . . . . .	62
5.3	Trabajo futuro . . . . .	63
	<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>
<hr/>		
	Apéndices	
<b>A</b>	<b>Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030</b>	<b>68</b>
A.1	Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) . . . . .	68
A.2	Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto . . . . .	68
<b>B</b>	<b>Implementación de la solución</b>	<b>70</b>
B.1	Cálculos de complejidad como número de soluciones . . . . .	70
B.1.1	Complejidad de las variables del problema . . . . .	70
B.1.2	Complejidad del problema completo . . . . .	72
B.1.3	Complejidad del problema en dos partes . . . . .	72
B.1.4	Complejidad del problema con horario fijo . . . . .	72
B.2	Aplicación práctica del modelo . . . . .	72

---

---

# CAPÍTULO 1

## Introducción

---

### 1.1 Resumen

---

Este Trabajo Fin de Grado emplea la teoría de los problemas de satisfacción de restricciones (CSP) para desarrollar un modelo práctico enfocado en la gestión eficiente de la planificación horaria en el ambiente empresarial. La aportación de este trabajo es utilizar estos principios para abordar un caso real, el de la programación de defensas de Trabajos Fin de Grado en la Facultad de Administración y Dirección de Empresas de la Universitat Politècnica de València.

En la parte teórica del trabajo, se realiza un análisis detallado del impacto de la gestión de recursos en las empresas y la evolución que ha experimentado con la llegada de nuevas tecnologías y métodos de gestión, con especial atención en los problemas de satisfacción de restricciones.

El modelo propuesto se basa en un problema de satisfacción de restricciones con optimización de variables, dividiendo la tarea en partes más pequeñas para maximizar la eficiencia y reducir el tiempo de ejecución. El sistema ha sido implementado como una aplicación para uso real, optimizando la asignación de miembros de los tribunales y reduciendo significativamente el tiempo de gestión, que pasa de más de 15 horas al año a ser casi inmediato.

A un coste de implementación estimado en 5000€, el modelo ha demostrado su capacidad para aportar valor a la administración y a los tribunales mediante una mejora en la eficiencia y un ahorro de costes. Aunque ha sido desarrollado para una facultad específica, el modelo tiene el potencial de aplicarse en otras áreas de la universidad y en el ámbito empresarial, ayudando a gestionar de manera eficiente los recursos limitados.

En definitiva, este Trabajo Fin de Grado aplica la teoría de los problemas de satisfacción de restricciones a un caso práctico y ofrece una solución efectiva y eficiente para la gestión de la asignación en entornos de alta demanda y recursos limitados. A través de su implementación, se demuestra un impacto significativo en la optimización de costes y la eficiencia en la gestión de recursos.

### 1.2 Objetivos

---

El objetivo general de este trabajo es ilustrar la importancia y el potencial de los sistemas de gestión de recursos en las empresas, destacando la incidencia de la tecnología en este ámbito. Con el objetivo de ejemplificar esto, se desarrollará una aplicación práctica

de asignación de horarios para las defensas de Trabajos Fin de Grado en la Facultad de Administración y Dirección de Empresas.

Los objetivos específicos se desglosan en dos partes, una teórica y otra práctica. En el ámbito teórico, se pretende:

- Definir la asignación de recursos, y las metodologías y herramientas empleadas en su gestión.
- Subrayar la importancia de una correcta gestión de recursos en las empresas y el valor añadido que esta puede aportar.
- Exponer los cambios y evoluciones que la tecnología ha traído al campo de la asignación de recursos.
- Enfocar la asignación de recursos desde la perspectiva de los problemas de satisfacción de restricciones.
- Demostrar la utilidad del modelo aplicado en el caso práctico a un entorno empresarial.

Para el aspecto práctico, los objetivos específicos son:

- Investigar el problema de asignación horaria de defensas y tribunales y definir distintas soluciones posibles que se ajusten a la formulación.
- Establecer un diálogo con la administración para comprender sus necesidades y requisitos y desarrollar una solución que se adapte a ellos.
- Formular un modelo matemático que defina el problema en el marco de los problemas de satisfacción de restricciones.
- Implementar una mejora del proceso administrativo existente que pueda ser útil para la facultad, reduciendo el tiempo dedicado a la asignación y mejorando su eficiencia.

Este trabajo buscará, a través de una comparación entre el nuevo modelo y el método existente, evidenciar las ventajas de aplicar técnicas avanzadas para la gestión de recursos. Se evaluará la capacidad del modelo propuesto para satisfacer las restricciones del caso práctico, así como su impacto en términos de beneficios para el departamento y relación con el presupuesto del proyecto.

Además, el objetivo es que la solución a este caso práctico no sea meramente teórica, sino que también aporte un beneficio a la administración encargada de llevar a cabo el proceso que se modela. Así, el trabajo no solo busca explicar y demostrar ciertos conceptos, sino también aportar una mejora tangible a la facultad que perdure incluso después de que el trabajo haya terminado.

### **1.3 Motivación**

---

Las habilidades y conocimientos desarrollados en el doble grado de Ingeniería Informática y Administración y Dirección de Empresas proporcionan un perfil que encaja mucho con este trabajo. Más allá de poder aplicar la tecnología a un problema desde la perspectiva de una ingeniería, y de comprender el funcionamiento de una empresa y la cadena de creación de valor, la carrera muestra una combinación de ambos. Esto permite

evaluar una implementación técnica no solo por su eficiencia matemática, sino también por los efectos que puede tener sobre un entorno empresarial.

He elegido este trabajo con el propósito de emplear ambos aspectos de mi perfil, y utilizar mi entendimiento de conceptos técnicos para evaluar el impacto de su implementación en los procesos empresariales. Mi interés se centra en explorar todos los conceptos relevantes al problema que he adquirido durante la carrera de Administración y Dirección de Empresas, estableciendo relaciones entre ellos y evaluando las tecnologías que podrían generar un efecto positivo en su aplicación.

El problema específico que se aborda, la asignación de horarios y tribunales para los Trabajos de Fin de Grado en la Facultad de Administración y Dirección de Empresas, surge de una necesidad real por parte de la administración de la facultad para agilizar este proceso.

Mi motivación personal para resolver este caso se deriva del deseo de que el esfuerzo invertido en el desarrollo de mi Trabajo de Fin de Grado resulte en una mejora tangible de algún proceso, que a su vez beneficie a la facultad. Mas allá del análisis de costes y beneficios de la implementación, mi motivación para abordar esta resolución viene de querer utilizar las herramientas que la carrera me ha enseñado para traer una mejora al entorno que me rodea.

## 1.4 Metodología

---

La metodología empleada en este Trabajo de Fin de Grado está formada por una serie de pasos estratégicamente diseñados y ejecutados. El primer paso consiste en construir un fundamento teórico en el que se examinará la importancia de la asignación de recursos, los diferentes modelos existentes, la tecnología que utilizan y la formulación de problemas de satisfacción de restricciones.

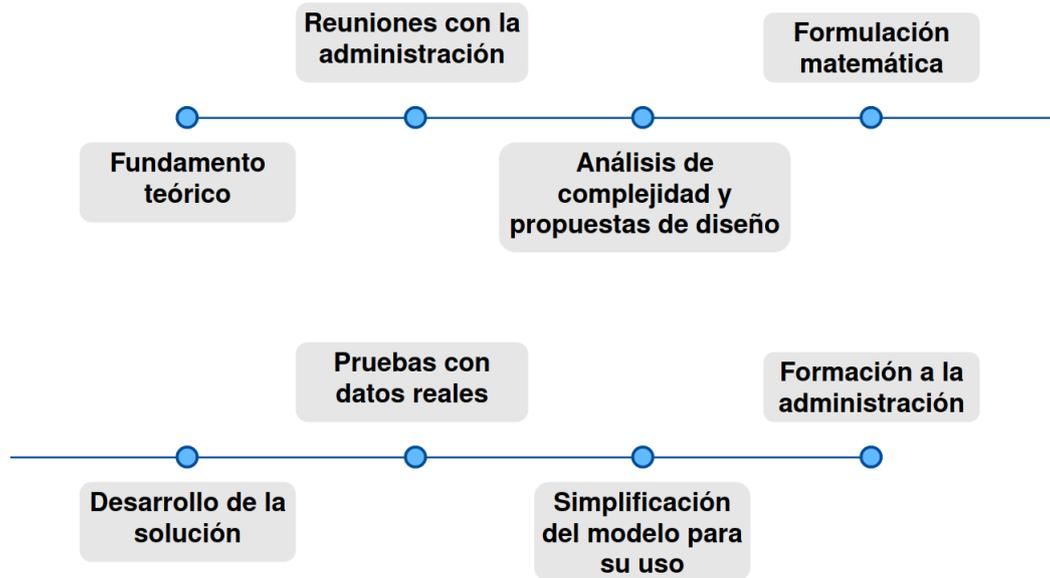
Seguidamente, se realizarán una serie de reuniones con la administración para estudiar y definir la tarea a optimizar, las restricciones, los datos de entrada y salida, los puntos a optimizar y otros aspectos del problema. Luego se llevará a cabo un estudio de complejidad y costes para determinar el modelo más adecuado para resolver el problema, comunicando la resolución con la administración durante el proceso para ajustarse a su flujo de trabajo.

A continuación, se formulará matemáticamente el modelo, definiendo los diferentes aspectos del problema a través de variables y funciones que aplican todas las restricciones. Después de eso, se implementará el modelo ajustándose a las necesidades de la administración. Este modelo se probará con datos reales, iterando y modificando la formulación para obtener una solución que cumpla con los requisitos.

Posteriormente, se ajustará la implementación a un entorno de aplicación para minimizar la dificultad de su uso por parte de la administración, finalizando con un sistema completo y versátil que buscará proporcionar una herramienta útil. Por último, se comprobará la implementación con casos reales, comparándola con el proceso anterior para realizar una evaluación empírica que considere las diferentes facetas del problema.

Estos pasos de la metodología se encuentran resumidos en la figura 1.1.

Para implementar el modelado de la solución, se hará uso de la metodología ágil (sección 2.1.4), la cual posibilitará el avance del proyecto en etapas compactas y revisables. Esto permitirá evaluar modelos parciales a lo largo del proceso de desarrollo y, de esta manera, realizar las modificaciones necesarias para asegurar que la solución se adecúa a los requisitos estipulados por la administración.



**Figura 1.1:** Pasos a realizar en el desarrollo e implantación del modelo

Este proceso se llevará a cabo mediante la aplicación de la metodología ágil Scrum, adaptada para un equipo de desarrollo de un solo miembro. Este enfoque permite el avance del proyecto en iteraciones cortas, las 'Sprint', durante las cuales se definen tareas específicas relacionadas con los objetivos, se presenta el trabajo completado y se revisa y propone mejoras para el próximo Sprint en reuniones regulares con la administración.

Para el desarrollo del modelo final, se emplearán problemas de satisfacción de restricciones, que son problemas matemáticos que implican un conjunto de objetos cuyo estado debe cumplir con ciertas restricciones. Esta metodología de gestión de recursos se adapta al problema específico y proporciona los fundamentos para la formulación del modelo.

La implementación del modelo se llevará a cabo mediante la herramienta "Google Colaboratory" (Google Colaboratory, 2023). Este software, integrado en Google Drive, facilita la formulación de modelos matemáticos para problemas de restricciones a través de un lenguaje de modelado de restricciones llamado "MiniZinc". Este lenguaje de código abierto facilita la traducción de los modelos a una amplia gama de algoritmos para la resolución de problemas de restricciones (Nethercote et al., 2007).

## 1.5 Relación con las asignaturas de la titulación

La base teórica de este Trabajo de Fin de Grado está fundamentada en varias asignaturas de las titulaciones de ADE, principalmente dentro de la rama de Organización de Empresas.

En primer lugar, la asignatura de Dirección de Producción y Operaciones (DPO) del grado de ADE proporciona el conocimiento esencial sobre los sistemas ERP, que son fundamentales para la comprensión y la implementación de los modelos de restricciones en la gestión de recursos empresariales. Asimismo, la importancia de la tecnología en la gestión, el marco de los recursos en la estructura de una empresa, y las diversas metodologías de gestión estudiadas en las asignaturas de Dirección de Recursos Humanos y Estrategia y Diseño de la Organización, han proporcionado conocimientos cruciales para la realización de este trabajo.

Por otro lado, las asignaturas de Comercialización e Investigación de Mercados han influido directamente en el enfoque de este estudio. En concreto, Dirección Comercial brinda un marco de cómo las metodologías de gestión pueden afectar la ventaja competitiva y el posicionamiento de una empresa, mientras que Investigación Comercial aborda la importancia de los recursos y la eficiencia tecnológica en un entorno competitivo.

En lo que respecta a la especialidad de Organización y Gestión de Empresas dentro de la Ingeniería Informática, proporciona una base sólida para entender el funcionamiento técnico y la aplicación de estas herramientas en el ámbito empresarial.

El desarrollo práctico del modelo presentado en este trabajo se basa en el conocimiento adquirido en la materia de Métodos Cuantitativos para la Empresa, particularmente en las asignaturas de Investigación Operativa y Métodos Cuantitativos para la Ayuda a la Toma de Decisiones. En estas asignaturas se han estudiado en detalle los problemas de programación lineal, los sistemas de satisfacción de restricciones, las metodologías de optimización, y diversas técnicas de modelado.

No obstante, el modelo propuesto en este Trabajo de Fin de Grado va más allá de los presentados en estas asignaturas, requiriendo un esfuerzo adicional para aprender las herramientas necesarias y alcanzar un nivel de comodidad en su uso. Sin embargo, la visión completa de los departamentos y sistemas de una empresa, así como de sus relaciones, proporcionada por la titulación de ADE, permite diseñar modelos que se ajustan mejor a la realidad y proporcionan un mayor valor añadido.

## 1.6 Orden documental

---

Este Trabajo de Fin de Grado se divide en dos partes. Los capítulos 2 y 3 proporcionan un fundamento teórico y exploran los diferentes aspectos de la gestión de recursos en las empresas, incluyendo las metodologías y tecnologías que han generado cambios significativos en el campo. El capítulo 4 se dedica al desarrollo de un caso práctico, en el que se examina un proceso real de asignación de recursos para identificar y aplicar el modelo más adecuado.

A continuación se detallan los capítulos y la información que presentan:

- 2. Asignación de recursos en empresas:** Este capítulo define los recursos y las diferentes metodologías de asignación, estableciendo su importancia en las empresas y proporcionando ejemplos de las ventajas competitivas que puede traer una buena gestión de estos.
- 3. Transformación de la asignación de recursos y los problemas de restricciones en empresas:** En este capítulo, se exploran las herramientas que respaldan la asignación de recursos y se desarrolla el concepto de problemas de restricciones. Además, se describen las diferentes tecnologías que pueden resolver estos modelos y potenciar su uso en las empresas.
- 4. Propuesta:** En este capítulo se desarrolla el caso práctico, definiendo el problema en detalle, explorando los modelos posibles, detallando el modelo final utilizado para la resolución y los resultados de su implementación. También se realiza una evaluación de las mejoras frente al proceso anterior, así como el presupuesto y la rentabilidad de la propuesta.
- 5. Conclusiones:** En este capítulo, se repasan los puntos más importantes presentados a lo largo del trabajo. Se resumen las conclusiones más relevantes del caso práctico y

se evalúa la eficacia de la propuesta en términos de rentabilidad y mejora del proceso. Se reflexiona sobre las limitaciones del estudio y se proponen recomendaciones y posibles mejoras para trabajos futuros.

---

---

## CAPÍTULO 2

# Asignación de recursos en empresas

---

### 2.1 Conceptos básicos

---

Según el diccionario económico y financiero de Eumed (s.f.), los recursos se definen como “un conjunto de capacidades humanas, elementos naturales y bienes de capital, escasos en relación a su demanda, que se utilizan casi siempre conjuntamente para producir bienes y servicios”.

En cualquier economía, es fundamental que estos recursos se utilicen de manera efectiva y eficiente para asegurar un crecimiento continuado y sostenible. En una empresa, los recursos son esenciales para la creación de valor y por lo tanto su gestión debe ser realizada siguiendo unas estrategias establecidas.

Parte de esta gestión recae en la planificación estratégica. A través de una dirección definida, se establecen objetivos realistas a corto, medio y largo plazo. Estos objetivos proporcionan una base que permite a las empresas asignar sus recursos de manera adecuada, y evaluar su progresión a lo largo del ejercicio.

Además de una supervisión general, que permite a la empresa mantener un rumbo firme hacia sus objetivos, es necesario supervisar los procesos desde un enfoque individualizado. Esta gestión se enmarca en la optimización de procesos, que busca revisar y mejorar los procesos de manera continua para maximizar la eficiencia y minimizar el desperdicio. Existen una gran variedad de herramientas para llevar a cabo esta optimización, desde prácticas y procesos particulares a cada industria, hasta modelos matemáticos que simulan los procesos y encuentran puntos de ineficiencia.

La Investigación Operativa, definida por la Federación Internacional de Sociedades de Investigación Operativa (IFORS) como “una disciplina que busca apoyar la toma de decisiones de gestión mediante la aplicación de un enfoque científico a problemas gerenciales que involucren factores cuantitativos”, es una herramienta imprescindible en la gestión de los recursos.

La Investigación Operativa utiliza técnicas matemáticas, estadísticas y modelos computacionales que permiten modelar problemas complejos y abordar las áreas de planificación estratégica y optimización de procesos para encontrar soluciones concretas. Aplicando estos modelos a la gestión empresarial, se puede obtener información valiosa y respaldada por datos que conduzca a una mayor eficiencia y rentabilidad. En entornos cambiantes, la Investigación Operativa proporciona innovación y adaptabilidad para enfrentarse a cambios en el mercado o en las necesidades de los clientes.

### 2.1.1. Recursos

Como se ha mencionado previamente, los recursos son una parte imprescindible en la organización y operativa de una empresa. Debido a esto, es importante entender el carácter y la naturaleza de los distintos recursos utilizados en el entorno empresarial. En este apartado se profundizará individualmente en los recursos humanos, materiales y financieros, proporcionando ejemplos y destacando su importancia en la asignación y gestión de recursos en la empresa.

Los recursos humanos están formados por las personas empleadas y sus habilidades, las cuales tienen una función crítica en el éxito de una empresa. Proporcionan una fuente de ventaja competitiva sostenida, contribuyendo al rendimiento de la empresa y ofreciendo habilidades y conocimientos específicos difíciles de replicar o sustituir por recursos alternativos (Wright, McMahan y McWilliams, 1994).

Aunque pueda parecer que la gestión de los recursos humanos recaiga sobre prácticas no cuantificables, como la motivación y el liderazgo, dentro de estas resulta imprescindible utilizar herramientas de investigación operativa, como la planificación de personal y el análisis de la rotación de plantilla, para optimizar la asignación de tareas y mejorar la eficiencia de la empresa.

Los recursos materiales, que incluyen equipos, infraestructuras, materias primas y suministros, forman también una parte crítica de la gestión de recursos en una empresa. La capacidad de acumular y desplegar estratégicamente los recursos materiales es fundamental para mantener la ventaja competitiva (Dierckx y Cool, 1989). Esta gestión, que incluye monitorizar, actualizar, mantener y reemplazar los recursos a lo largo del tiempo, es necesaria para mantener su valor y eficacia.

Al igual que con los recursos humanos, los recursos materiales requieren un enfoque científico y cuantificable para su asignación y utilización adecuada. Herramientas como el análisis de la depreciación, la evaluación del rendimiento y la planificación de la inversión refuerzan la importancia de la investigación operativa en este ámbito.

Los recursos financieros, como el capital y las inversiones, son esenciales para el éxito y la supervivencia de una empresa. Además, hay técnicas de investigación operativa que se aplican ampliamente en su gestión como el análisis de coste-beneficio y la evaluación del rendimiento financiero. Sin embargo, en este trabajo nos centraremos en los recursos humanos y materiales, puesto que son los más relevantes para nuestro caso de estudio de una asignación horaria.

### 2.1.2. Gestión

Para abordar la asignación de recursos en un entorno económico moderno, es necesario contextualizar los recursos anteriormente definidos, así como las acciones gerenciales que los asignan y determinan, en un sistema específico y adaptable. La necesidad de herramientas complejas que integren los aspectos cualitativos de la organización de los recursos con los cuantitativos de la investigación operativa se ve impulsada por el creciente acceso de las empresas a capacidad computacional y modelos matemáticos avanzados.

La gestión de flujos de trabajo, o *workflow management*, y procesos empresariales describen sistemas o procesos que definen, supervisan y coordinan la ejecución de tareas para alcanzar un objetivo establecido. Para lograr este objetivo, el sistema garantiza que el flujo de trabajo se lleve a cabo de manera eficiente al garantizar que la persona o el recurso adecuado realice la tarea correcta en el momento oportuno (Aalst & Hee, 2004).

En el contexto de la asignación de recursos, la gestión de flujos de trabajo tiene como objetivo determinar tareas específicas que deben realizarse, identificando a los individuos necesarios para cada una, así como los recursos requeridos. Este proceso busca ofrecer una visión más integral de las necesidades temporales y materiales de una tarea, lo que permite a las empresas abordar su desempeño con mayor precisión y tomar decisiones operativas más acertadas.



**Figura 2.1:** Ejemplo de un flujo de trabajo para la gestión de reclamaciones

En la imagen "Ejemplo de un flujo de trabajo para la gestión de reclamaciones" obtenida siguiendo los principios establecidos en el libro "Workflow management - models, methods and systems", se pueden observar distintos componentes que representan las etapas y decisiones involucradas en el proceso de resolver la reclamación. Comenzando por el círculo verde, la primera etapa etiquetada "Reclamación" representa la recepción y registro de una reclamación del cliente. Durante la siguiente etapa, "Atención al cliente", un representante de atención al cliente recibe la reclamación y busca una solución adecuada. En el rombo amarillo se evalúa si el representante de atención al cliente ha sido capaz de resolver la reclamación, en caso de ser así se finaliza la tarea en el círculo rojo. En caso de no estar resuelta la reclamación, el flujo continúa hasta el cuadrado de "Técnico", donde un técnico especializado puede analizar el problema para encontrar una solución adecuada.

A través de diagramas como este, la herramienta de flujo de trabajo puede formular modelos matemáticos que analicen los recursos que consumirán las tareas, ajustando la estrategia y los objetivos establecidos. Aunque el diagrama no contempla otros departamentos o recursos materiales, estas herramientas son capaces de modelar una gran

variedad de procesos económicos. En modelos más complejos, las simulaciones identifican fácilmente los cuellos de botella existentes en la producción. Al reconocer estos cuellos de botella, las empresas pueden enfocar la optimización de recursos mediante la investigación operativa en las áreas más críticas de su actividad.

Además de la gestión de flujos de trabajo, existen otros sistemas que modelan la asignación de recursos y buscan mejorar la eficacia de los procesos en las empresas. Los sistemas de Planificación de Requerimientos de Materiales (MRP) se enfocan en la planificación y gestión de los recursos materiales y de producción, y son un componente esencial de la cadena de suministro (Wight, 1984). Es decir, ofrecen una visión más específica a los recursos materiales, proporcionando herramientas para controlar los niveles de inventario y controlar las compras de materiales y suministros. Los sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) ofrecen un enfoque distinto a los MRP, se definen como soluciones integradas que permiten a las empresas gestionar de manera centralizada sus operaciones en tiempo real, abarcando áreas como finanzas, producción, recursos humanos, compras, ventas y logística (Klaus, Rosemann, & Gable, 2000). En estos sistemas, se ofrece una visión centralizada de los recursos y procesos, diseñada para facilitar la toma de decisiones y la coordinación entre departamentos y actividades de la empresa. Estos sistemas se detallarán más adelante en el punto 2.3.

### 2.1.3. Procesos

Para realizar la implementación de estos sistemas de gestión de manera efectiva, es necesario un marco organizativo que permita a la empresa realizar la asignación de sus recursos incorporando todas las facetas vistas anteriormente. Para esto se definen una serie de procesos clave que incluyen la planificación, la programación, la asignación y el seguimiento y control de recursos (Kerzner, 2017).

En este proceso, se comienza por la planificación de recursos, identificando necesidades de recursos a corto, medio y largo plazo según los objetivos estratégicos y operativos. Es importante reflejar una imagen precisa de las capacidades actuales de la empresa, para localizar posibles deficiencias en los recursos y planificar la adquisición o desarrollo donde sea necesario.

A continuación, se desarrolla la programación de recursos, asignando los recursos a tareas y proyectos específicos en un periodo de tiempo acotado. También se determina la prioridad de las tareas y proyectos, buscando ajustar estos a plazos y objetivos de la actividad. La programación es un proceso dinámico, ya que suele requerir ajustes por cambios de disponibilidad, prioridades y el entorno empresarial. Además, los cambios en tareas de alta prioridad suelen suponer grandes movimientos en la planificación, ya que estas utilizan recursos escasos o forman un cuello de botella con las tareas contiguas.

El proceso siguiente, de asignación de recursos, es de especial importancia en la investigación operativa, ya que consiste en distribuir los recursos entre las diferentes tareas y proyectos, definiendo las cantidades que asignar en función de los criterios establecidos. Estos procesos se ajustan con mayor facilidad a modelos de optimización y asignación, motivado por el requerimiento de utilizar recursos escasos de manera eficiente y facilitado por la naturaleza más estática de los problemas.

Finalmente, es necesario llevar un seguimiento y control de recursos durante la ejecución del proyecto. Esto implica monitorizar el uso de los recursos, realizar medidas de la efectividad de las tareas y corregir posibles problemas y desviaciones. Esta monitorización se puede realizar a través de informes de progreso, métricas de desempeño y auditorías de recursos. En el caso de localizar problemas o áreas de mejora, se deberán

realizar las modificaciones pertinentes, ajustando los procesos de programación y asignación cuando sea necesario.

#### 2.1.4. Herramientas y metodologías

Además de los procesos clave de planificación, programación, asignación y seguimiento, es importante establecer un enfoque de mejora continua en la gestión de recursos y procesos empresariales. Esta implica dedicar esfuerzo constante para optimizar y perfeccionar las operaciones de la empresa, maximizando la eficiencia y minimizando los desperdicios. En este contexto, existen diversas herramientas y metodologías enfocadas de manera distinta a las optimizaciones que buscan reducir costes y aumentar la satisfacción de cliente, tales como CPM, Ágil y Lean.

El método de ruta crítica (CPM) fue desarrollado en la década de 1950 por James Kelley y Morgan Walker (James, 1961), después de su éxito en la gestión de proyectos desarrollados por el gobierno estadounidense que requerían la coordinación de grandes cantidades de recursos humanos y materiales. Esta técnica se basa en identificar el camino crítico, un conjunto de tareas que determina la duración del proyecto. Estas tareas tienen importancia ya que no pueden sufrir retrasos sin que el proyecto entero se retrase, es decir, su finalización condiciona la del proyecto entero. Esta importancia hace que las mejoras de eficiencia para estas tareas pueda llevar a reducciones en la duración total del proyecto. Además, el equipo gestor puede llevar un seguimiento prioritario y anticipar posibles retrasos en la ejecución del proyecto (Galloway, 2006).

Con el avance de la informática y el auge del desarrollo de software, se hizo evidente la necesidad de manejar procesos de grandes proyectos en entornos altamente cambiantes. En estos entornos el desarrollo no estructurado generaba productos difíciles de mantener, los cuales se volvían obsoletos con rapidez. Las metodologías Ágiles, surgidas en el auge del desarrollo software, basan sus principios en la adaptabilidad, colaboración y mantenimiento continuo del valor (Beck, K., et al., 2001). Las técnicas propuestas ayudan a responder con velocidad a cambios en las especificaciones del cliente y necesidades del entorno, iterando y ajustando los procesos con reuniones periódicas para maximizar la comunicación y flexibilidad.

El enfoque Lean, originario del modelo de producción implementado en la década de 1950 por Toyota, concentra sus esfuerzos en la reducción del desperdicio. En este enfoque de optimización, se identifican los puntos de generación de valor en la empresa, visualizando el flujo de este valor creado desde su concepción hasta su llegada al cliente (Kracik, J.F., 1988). A través de este análisis el método Lean busca la perfección, optimizando cada eslabón de la cadena de valor para maximizar el valor obtenido.

A pesar de que estos métodos difieren considerablemente y ofrecen distintos enfoques, todos contribuyen de alguna forma a la gestión de recursos. Para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se incorporarán conceptos de cada uno de los métodos, aprovechando las fortalezas de cada enfoque y mostrando distintos aspectos de la resolución del problema propuesto. Este caso práctico es particularmente interesante, ya que su resolución se puede abordar desde diversas perspectivas. Por un lado, la tecnología de la solución utiliza conceptos análogos a los de la ruta crítica, distribuyendo tareas en un cronograma para obtener los plazos de inicio y finalización de las tareas. Por otro lado, el software desarrollado para realizar la tarea que debe cumplir con ciertos requisitos, ofrecer un servicio y adaptarse a un entorno existente, se alinea con el seguimiento que ofrece una metodología ágil en su desarrollo. Finalmente, la solución propuesta pretende optimizar un proceso clave para maximizar el valor obtenido, una perspectiva muy alineada con la metodología Lean.

## 2.2 Importancia de la distribución de recursos

---

### 2.2.1. Teoría de ventaja competitiva

En secciones anteriores, se ha explorado la gestión de recursos desde diversas perspectivas empresariales. Comenzando con una definición básica de los recursos, se ha ampliado la visión para incluir los procesos que regulan el flujo de estos recursos, así como los marcos gerenciales que definen las estrategias que una empresa adopta para su administración.

Estas metodologías, a través de distintas técnicas y enfoques, buscan mejorar los procesos que manejan estos recursos: minimizar su duración, optimizar su uso, eliminar los innecesarios y concentrar los esfuerzos de mejora en los más críticos. Estas iniciativas, orientadas a mejorar la actividad productiva de la empresa, tienen como objetivo final generar una ventaja competitiva. Esto se traduce en el desarrollo de un sistema de valor añadido superior al de los competidores y valioso para el consumidor, ya sea a través de un producto más económico o la diferenciación del producto (Porter, 1985).

Para enfocar este concepto de ventaja competitiva hacia un análisis centrado en la producción, donde las técnicas de gestión de recursos tienen un mayor impacto, es necesario enmarcar el concepto de ventaja competitiva en distintas áreas de valor. En su libro *The Discipline of Market Leaders* (Treacy y Wiersema, 1995), Treacy y Wiersema proponen tres dimensiones para medir la capacidad de una compañía de liderazgo en su mercado:

1. Relación con el cliente
2. Liderazgo del producto
3. Excelencia operativa

Si enfocamos el análisis sobre la dimensión de excelencia operativa, podemos distinguir 5 componentes esenciales para su obtención (Juran, 1986):

1. Entendimiento de los principios rectores: Planificación, control y mejora de la calidad
2. Mejorar la satisfacción del cliente
3. Mantener una infraestructura para la participación de personas empleadas
4. Construir una infraestructura del cambio efectiva y eficiente
5. Impulsar efectividad y agilidad de procesos empresariales

Este desglose nos permite analizar el impacto competitivo que puede surgir de la aplicación de los métodos propuestos en secciones anteriores. Enfocando el análisis en los posibles efectos en el valor generado que puede tener la implementación de estos métodos.

### 2.2.2. Aplicación de los métodos anteriores en la competitividad empresarial

Las ventajas operativas que puede traer el método de ruta crítica provienen de su análisis concreto y futuro sobre la realización temporal de las tareas del proyecto. Como se ha descrito en la sección anterior, esto distingue a aquellas tareas críticas para la realización del proyecto y así permite priorizar y concentrar los esfuerzos en ellas. Estas mejoras

repercuten sobre el ciclo productivo, acortando la duración de los procesos y aumentando su productividad. Este aspecto del CPM afecta al principio nº5 de Juran, ya que su impacto sobre los procesos se enfoca en agilidad y optimización de las operaciones.

Además, otro aspecto importante del CPM es su capacidad de anticipación y respuesta a los riesgos. La capacidad de prever los efectos de posibles retrasos sobre la duración del proyecto permite preparar planes de contingencia dirigidos y equipos de respuesta rápida. Este impacto se puede enmarcar en el principio nº4 de Juran, aportando una herramienta para facilitar a la administración el estudio de los efectos de un cambio.

Las metodologías ágiles tienen un enfoque centrado en adaptabilidad y colaboración, proporcionando soluciones iterativas que pueden adaptarse fácilmente a necesidades del cliente y del mercado. Estos conceptos básicos responden principalmente a los principios 4 y 2 de Juran, impulsando un sistema de cambio que enfoca sus esfuerzos en la respuesta rápida y satisfacción del cliente.

Uno de los sistemas ágiles mejor conocidos es el Scrum. En este, se trabaja en equipos de no más de 10 personas hacia objetivos que se deben conseguir en incrementos de tiempo fijos y menores a un mes llamados *Sprint* (Takeuchi & Nonaka, 1986). El avance hacia los objetivos se mide en reuniones diarias de unos 15 minutos, y al completar cada *Sprint*. El uso intensivo de las evaluaciones a lo largo del proceso productivo, el tiempo de ciclo corto para los objetivos marcados y los equipos de tamaño reducido, permiten a el sistema Scrum ofrecer una herramienta eficaz de participación a las personas empleadas. El sistema Scrum permite a estas participar activamente en la identificación y resolución de problemas en la producción, cubriendo el componente 3 del sistema Juran.

El enfoque Lean centra sus actuaciones en la reducción de desperdicios, maximizando la creación de valor para el cliente. La filosofía Just-In-Time, que permite a la compañía activar los recursos de su cadena de producción a medida que son utilizados, contribuye a reducir costes y mejorar la eficiencia utilizando los recursos para producir bienes solo cuando sea necesario. Lean proporciona efectividad a los procesos industriales y mejoras a la satisfacción del cliente, respondiendo con velocidad a fluctuaciones en la demanda, principios 1 y 5 de Juran.



Figura 2.2: Visualización de la relación entre las metodologías de gestión y los principios de Juran

## 2.3 Ventaja competitiva en entornos reales

---

Habiendo analizado la teoría de la ventaja competitiva, así como su relación con los distintos procesos de distribución de recursos, es importante ilustrar cómo estos principios se aplican a casos reales.

Este apartado considerará dos casos de estudio: Toyota Motor Corporation y Amazon.com. Estas dos empresas destacan por sus estrategias innovadoras en la gestión de recursos, a través de las cuales han alcanzado y mantenido una ventaja competitiva. A pesar de esto, las metodologías y tecnología utilizada de los dos casos en la gestión de recursos difieren considerablemente, ilustrando la variedad de enfoques que puede tomar la gestión de recursos.

### 2.3.1. Caso práctico Toyota

Toyota Motor Corporation es una multinacional japonesa manufacturera de coches. Fundada en 1937 por Kiichiro Toyoda, Toyota creció rápidamente en la década de los 1950s para convertirse en una empresa global.

En este entorno, Toyota recibía competición de grandes empresas en EEUU y Europa, que dominaban el mercado global y tenían un mayor alcance de recursos y tecnología. Estas empresas enfocaban su estrategia en la maximización de la producción y la acumulación del inventario, métodos que en ese momento se relacionaban con la producción en masa. Este enfoque pretendía hacer uso de economías de escala, produciendo grandes cantidades de manera continua para reducir costes unitarios de producción. A pesar de aumentar la eficiencia unitaria, esta estrategia tenía tendencia a generar inventarios excesivos, y requería de múltiples inspecciones posteriores para detectar y corregir defectos en los productos, reduciendo la efectividad y agilidad del proceso productivo (Womack, Jones & Roos, 2007).

En este contexto, Toyota necesitaba obtener una excelencia operativa que pudiese competir con las reducciones de costes por economía de escala que tenían las empresas competidoras. Para enfrentarse a este desafío, Toyota desarrolló el Sistema de Producción Toyota (TPS), una metodología de gestión de recursos que posteriormente se ha enmarcado dentro de Lean.

El pilar principal de esta metodología era el Just-In-Time, que consistía en producir y almacenar solo las unidades necesarias en las cantidades necesarias para abastecer a la demanda. A través del perfeccionamiento de este aspecto de la producción, Toyota reforzaba los principios 4 y 5 de Juran, utilizando una mejor gestión de los recursos para tomar un control integral de su producción.

Para la correcta realización del objetivo final de reducir costes, Toyota puso énfasis en la aseguración de calidad en el proceso productivo. La metodología *Jidoka* establecía que cualquier persona de la plantilla tenía la capacidad de frenar el proceso productivo entero si encontraba algún defecto en su sección de la producción. Relacionado con el principio 3 de Juran, este aspecto reconocía el valor del recurso humano en la producción y enfocaba su utilización hacia una mejora de la calidad del producto.

Estas metodologías junto con otras desarrolladas en las décadas siguientes, permitieron a Toyota reducir el coste de su producto sin disminuir la calidad. A través de ellas Toyota pudo obtener una ventaja competitiva y liderazgo en costes que la convirtió en un líder de la industria.

### 2.3.2. Caso práctico Amazon

Con la llegada de la revolución tecnológica, se marca un antes y un después en la gestión de recursos. Las metodologías existentes, como aquellas desarrolladas por Toyota, continúan siendo relevantes y sus fundamentos seguían guiando a la producción. Sin embargo, la evolución de modelos computacionales y herramientas digitales ha traído capacidades de análisis y organización que anteriormente no eran posibles.

Amazon, fundada por Jeff Bezos en 1994, empezó como una librería online. Desde el comienzo, la visión de Bezos fue expandir el negocio a la venta de todo tipo de artículos, trayendo al consumidor la compra online. Con el paso del tiempo, Amazon se ha expandido hasta convertirse en una empresa multinacional de comercio electrónico, ofreciendo computación en la nube, servicios de transmisión digital y otros. Ha conseguido expandir su alcance a una multitud de productos y servicios y actualmente es una de las empresas más grandes del mundo (Stone, 2013).

En los 1990s, el comercio electrónico era un mercado pequeño y desconocido. Pocos consumidores tenían acceso a ordenadores personales y había escepticismo hacia la seguridad y eficacia de la compra online. Con el crecimiento de la popularidad del internet, la idea de una librería que podía ofrecer una amplia selección y una forma conveniente de compra fue ganando popularidad. Para poder entrar en este nuevo mercado y expandir la venta de otros artículos, Amazon era consciente de la necesidad de entregar los artículos comprados al consumidor con la mayor velocidad posible. Una de las grandes promesas de la venta online era la eliminación de barreras geográficas en los artículos vendidos, pero para poder utilizar esta ventaja era necesaria una gran coordinación entre los almacenes de la compañía, moviendo el producto estratégicamente para minimizar la distancia del viaje entre el almacén en el momento de su compra y el hogar del cliente.

Las estrategias de gestión de recursos de Amazon han estado ligadas a los desarrollos tecnológicos que han aparecido durante la vida de la compañía. Desde el inicio, utilizaba algoritmos para predecir la demanda de productos en zonas geográficas, ajustando su inventario en función de predicciones futuras para minimizar los costes de desplazamiento de producto. Esta estrategia pretende abordar principios de excelencia operativa similares al Just-In-Time de Toyota. Sin embargo, combina esta flexibilidad en su generación de valor con sus tecnologías predictivas para ajustar sus recursos a una mayor sensibilidad a la demanda.

De manera similar a sus sistemas de distribución de producto, Amazon aplica modelos algorítmicos a su almacenaje. Su sistema de *Chaotic storage* delega la organización de los almacenes a un algoritmo, minimizando la cantidad que tienen que andar las personas y programando rutas específicas que tienen en cuenta variables como el peso de los productos y sus dimensiones (Baraniuk, 2015).

Finalmente, estas optimizaciones operativas de procesos básicos de producción ocurren también en la entrega de los productos. Se establecen las rutas de entrega para minimizar el transporte innecesario y se adaptan a factores como el tráfico en tiempo real.

Amazon ha conseguido llevar una ventaja competitiva fuerte desde su concepción debido a su apertura de mercados a través de exploración de nuevas tecnologías. Ha conseguido mantener un liderazgo en costes y una diferenciación simultánea debido a esta actualización constante en su utilización de recursos. Las innovaciones de Toyota en los 1950s en la gestión de recursos consistían en estrategias administrativas para integrar una actividad industrial con la naturaleza de su entorno. En contraste con esto, las innovaciones de Amazon han procedido de la integración de desarrollos tecnológicos en su generación de valor, combinando una investigación operativa agresiva con todos los aspectos de su negocio.

## 2.4 Aplicación de la asignación de recursos en empresas

---

Tras analizar la definición de los recursos, las metodologías para su gestión y los enfoques para la creación de valor, es necesario definir las herramientas que las empresas actuales utilizan para integrar estos principios. En un entorno económico dominado por la tecnología, es importante disponer de herramientas tecnológicas con la capacidad de aplicar, controlar y evaluar la realización de las políticas de gestión y asignación de recursos.

Por la importancia de estos recursos en todos los departamentos y actividades de una empresa, es inevitable que estas herramientas tengan la capacidad de interconectar la asignación de recursos a distintos niveles organizativos. Los recursos utilizados para la generación de valor en el principio de una cadena de producción están inexorablemente conectados con el producto final que la empresa vende, así como con el personal que los gestiona y los objetivos que la administración propone. Unir estas gestiones en un único sistema elimina la necesidad y el coste de trasladar la información entre ellas y asegurar una cohesión entre objetivos.

### 2.4.1. Sistemas de planificación de recursos empresariales

Los sistemas de planificación de recursos (ERP) evolucionaron de una creciente necesidad de integrar sistemas de gestión de recursos para conectar los distintos departamentos de la empresa. Esta interconexión permitiría coleccionar datos de todos los aspectos del negocio y ofrecer la capacidad de analizar, interpretar y utilizar estos datos para administrar la empresa.

Como se ha explorado en apartados anteriores, el origen de la gestión de recursos como sistema delimitado y preparado para el análisis proviene de los departamentos de producción de las empresas. El volumen y precisión requeridos en el manejo de inventarios y procesos de producción impulsó el desarrollo de sistemas de planificación de requerimientos de materiales (MRP), surgidos en los 1960s con la llegada de los computadores (Orlicky, 1975).

Estos sistemas de MRP fueron evolucionando con el tiempo, a lo largo de la década de los 1970s se fueron añadiendo funciones para manejar otros recursos en las plantas de fabricación. Estas funciones podían incluir cosas como la distribución de la fábrica y la cadena de producción, manejo de proyectos, departamentos financieros y otros. A pesar de un crecimiento de adopción a lo largo de la década, su uso seguía siendo limitado a grandes empresas del sector industrial.

Con los avances tecnológicos de los 1980s y 1990s, se popularizó una nueva clase de sistemas de planificación de recursos manufactureros (MRP II). MRP II incluía funcionalidades como programación horaria, planificación de capacidad, planificación de ventas y otros (Wight, 1984). Estos sistemas, que presentaban un crecimiento en adopción y alcance, eran el inicio de lo que pasó a conocerse como ERP.

En los 2000s y 2010s, la aparición de nuevas tecnologías basadas en el internet y la nube motivaron nuevos desarrollos en los sistemas ERP. Con esta tecnología las aplicaciones ERP podían obtener una mayor conectividad y comunicación entre distintas partes del negocio. Además, este enfoque escalable abría el acceso a empresas medianas y pequeñas para mejorar su gestión de recursos (Monk y Wagner, 2013).

Actualmente, la integración de nuevos desarrollos en inteligencia artificial proporcionan análisis detallados y predicciones futuras, contribuyendo a la toma de decisiones empresariales. Otras tecnologías como el Internet of Things (IoT), un sistema de con-

ción de dispositivos para intercambiar datos y automatizar tareas, permite aumentar la calidad y volumen de los datos disponibles para proporcionar una visión más realista y actualizada de las operaciones.

### Funciones

Los sistemas ERP actuales cubren todas las áreas funcionales de a empresa, estas se agrupan en módulos según el area funcional al que pertenecen. A continuación se delimitan los módulos más comunes en los sistemas ERP (Bradford, 2015):

- **Contabilidad de costes:** ERP permite planificar presupuestos desplegables por departamento y realizar un seguimiento de ellos. En estos se discierne entre tipologías de costes y productos para facilitar el análisis de la rentabilidad y ajustar los precios del producto o aplicar iniciativas de reducción de coste en la áreas de importancia.
- **Recursos humanos:** ERP facilita y mejora todas las áreas del departamento de recursos humanos. En el ámbito de la contratación, maneja a candidatos, programa entrevistas y formación, identifica habilidades y competencias requeridas y realiza métricas de inclusión y diversidad en la contratación. ERP también ofrece capacidades para la gestión de los horarios de las plantillas y el cálculo salarial, así como el de incentivos y comisiones.
- **Gestión de proyectos:** En la gestión de proyectos, ERP permite proyectar sobre un horario las tareas y actividades necesarias para completar el proyecto, asegurando que los recursos disponibles se distribuyen de manera equilibrada. Este desglose conecta con los costes del proyecto, el seguimiento de su completitud, las remuneraciones a la plantilla y la solución de problemas en la producción.
- **Contabilidad financiera:** ERP contribuye a la automatización de transacciones financieras, manejando la depreciación de activos, disminuyendo el tiempo de procesamiento de cobros y pagos, optimizando la inversión de excesos de efectivo y asegurando que los estados financieros son acordes a la regulación y la realidad de la empresa.
- **Proceso manufacturero:** El proceso manufacturero hace uso de una gran variedad de herramientas en los sistemas ERP, muchas provenientes de los antiguos métodos MRP. Aquí se manejan los flujos de trabajo, destinando recursos y utilizando materiales para balancear la demanda con la capacidad y reducir los cuellos de botella. También se gestiona la distribución horaria de las tareas en los procesos manufactureros, asegurando el cumplimiento de las metas y adaptando las provisiones de materias primas al proceso productivo. Otro aspecto importante que incluyen estos módulos es el de control de calidad, respaldando el análisis con sistemas de detección de errores, inspecciones y respuestas de clientes para identificar áreas de mejora del producto y proceso productivo.
- **Procesamiento de pedidos:** Los sistemas ERP incluyen funcionalidades de gestión de pedidos, ajustando la velocidad de la producción dinámicamente a los pedidos recibidos e informando al cliente del estado de su compra. En la venta de productos, ERP puede realizar controles automáticos del historial de un cliente, estableciendo límites de crédito y detectando pedidos en riesgo de impago. La combinación de información de inventario y producción en este módulo permite realizar recomendaciones de descuentos y promociones de producto. También permite analizar alternativas de transporte de producto terminado, equilibrando precio y velocidad para maximizar la satisfacción del cliente minimizando los costes de transporte.

- **Cadena de suministro:** A través de información de la cadena de suministro y combinando con los otros módulos, ERP puede analizar la necesidad actual y futura de suministros en la cadena de producción. Esto permite optimizar los pedidos y sus fechas para minimizar inventario y costes de transporte, así como coleccionar información más detallada sobre el estado de materias primas, producto en curso y producto terminado, mejorando la organización de los almacenes y facilitando la localización de artículos en stock.

A pesar de cubrir esta diversa gama de funcionalidades, los conceptos subyacentes que se aplican para permitir esta gestión son similares. Todos los sistemas ERP buscan representar los recursos disponibles a la empresa en sistemas discretos y cuantificables, para posteriormente realizar un análisis con herramientas matemáticas.

#### 2.4.2. Sostenibilidad y regulación

La búsqueda de modelos cuantitativos que representen situaciones cualitativas de maneras más ajustadas a la realidad ha visto grandes avances con modelos de creciente complejidad que reflejan más variables de los entornos en los que las empresas operan. No obstante, es importante entender que cualquier modelo, y las conclusiones obtenidas de él, son una simplificación de la realidad.

En secciones anteriores hemos analizado los beneficios que puede traer la aplicación de estrategias Lean a una producción. Sin embargo, esta "búsqueda de la perfección" puede poner presiones sobre proveedores y locales de venta que, a pesar de no afectar a la rentabilidad de la compañía dominante, repercuten negativamente sobre la economía general. La estrategia Just-In-Time permite a una compañía exigir sus materias primas en el momento de necesitarlas, eliminando ociosidades en la cadena de producción, pero traslada esa inestabilidad a los proveedores, que deben generar su producto y acumularlo sin garantía de que vaya a ser comprado.

Estos riesgos que pueden ser "invisibles" a los resultados de las compañías se hacen más evidentes cuando el mercado sufre grandes variaciones que interrumpen las cadenas productivas. En el caso de las empresas manufactureras de coches, que lideraban el uso de estas metodologías Lean, la crisis del Covid-19 seguida por la crisis de semiconductores hundió una cadena de producción que no tenía los márgenes necesarios para amortiguar los efectos de estas variaciones (Sodhi y Choi, 2022).

Con el desarrollo de modelos más potentes y entornos más capaces, pueden surgir otros problemas éticos en la optimización de los procesos y recursos. En este caso, el peligro no proviene de una falta de datos, o un modelo excesivamente simple, sino de los objetivos que la administración propone en el proceso de la optimización.

Por ejemplo, una empresa de transporte que desea optimizar su gestión de recursos debe analizar no solo que sistema de optimización llevar a cabo, sino también cual es el factor que se optimiza. Si la optimización únicamente considera factores de reducción de costes, el modelo no considerará variables como la contaminación del combustible utilizado o los efectos que puedan tener distintos medios de transporte sobre el bienestar de la plantilla.

En el caso de Amazon, se ha implementado un enfoque de optimización que busca reducir el tiempo de envío del producto, pasando de meses a semanas, de semanas a días, y de días a horas. Esta estrategia ha provocado que otros factores, como la calidad del trabajo y el impacto medioambiental, se vean minimizados en importancia, lo que ha dado lugar a un modelo económico insostenible y, en algunos casos, explotador (Winkie, 2022).

Cualquier sistema automatizado tiene el riesgo de dar soluciones erróneas, ya sea por factores no considerados o sesgos humanos en el proceso de la búsqueda de la solución. Las conclusiones obtenidas de cualquier sistema de gestión de recursos deben ser evaluadas por expertos con capacidad de una toma de decisión informada en estas variables de entorno, así como en los principios de sostenibilidad y regulación que la empresa debe seguir.

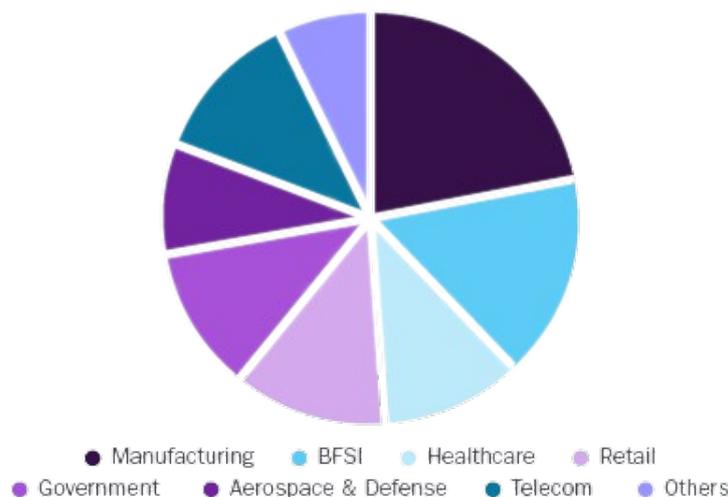
## 2.5 Recursos económicos dedicados a la asignación de recursos

En las secciones anteriores, se han analizado los posibles beneficios que las metodologías de gestión de recursos, enmarcadas en los sistemas ERP, pueden aportar a las empresas. Para llevar a cabo un análisis completo de estas tecnologías, es necesario desglosar el coste que representan para las empresas que las adoptan. Dichos costes no solo abarcan el precio de las herramientas y sistemas, sino también la reestructuración del negocio necesaria para su correcta implementación. Además, estos costes incorporan otros factores como la capacitación requerida para su uso en los distintos departamentos y el mantenimiento de la infraestructura.

El mercado global de software ERP tenía un valor de USD 54,76 billones en 2022, con predicciones de una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de 11,0% (GVR, 2023). Es decir, tamaños de muy alta magnitud que dominan el mundo software, de las 10 empresas más grandes en el mundo de software en 2019 (Forbes, 2019), 5 ofrecen principalmente productos ERP.

### Global ERP Software Market

share, by vertical, 2022 (%)



**Figura 2.3:** Participación de mercado global de software ERP, por vertical, 2022. Obtenido de GVR (2023).

Estos sistemas ofrecen herramientas muy valiosas en la ejecución de un negocio. Sin embargo, para hacer uso de su potencial es necesario un proceso de implementación ajustado a las realidades de la compañía. Una compañía que desea adoptar tecnologías ERP deberá realizar grandes modificaciones a sus procesos interiores, tanto productivos como administrativos.

A continuación se detallan las principales fases necesarias para la implementación de un sistema ERP en el entorno práctico de las empresas.

## Preparación del cambio

Para una implementación exitosa de ERP, es crucial comenzar con una comprensión y compromiso por parte de la administración respecto a los cambios necesarios para la ejecución del proyecto. Para ello, la empresa debe analizar meticulosamente todos sus procesos y estudiar aquellos que puedan ofrecer oportunidades de modernización. Para poder efectuar este análisis de manera efectiva, es importante que los procesos de la compañía estén alineados con su estrategia y que las soluciones automáticas propuestas se enmarquen también en esta. Debido a esto, las compañías con departamentos descentralizados y sistemas de gestión divergentes representan un desafío mayor, ya que la fusión de estas estrategias para un traspaso de información fluido puede requerir cambios significativos en la estructura y formato de la misma.

La personalización también juega un papel muy importante en la implementación de un sistema ERP. Una compañía puede contar con software preexistente para un departamento, adaptado a sus necesidades específicas. En este caso, podría resultar perjudicial reemplazarlo por un software genérico que aporte menos valor, aunque este último se integre mejor con la suite de servicios. Un buen sistema ERP debe facilitar la integración entre sus herramientas predeterminadas y las funciones adicionales que cada empresa define.

## Proceso de implementación

La duración de la implementación puede variar sustancialmente, dependiendo de múltiples factores, pero principalmente del grado de personalización que la compañía busca. El software de SAP, una compañía líder en sistemas ERP, cuenta con 8000 parámetros que deben estar correctamente definidos para un funcionamiento adecuado (Bingi, Sharma y Godla, 1999). Estos parámetros se ofrecen en productos predeterminados para minimizar el tiempo de implementación, pero un ajuste mayor proporciona a la compañía mejoras en su utilización e integración.

El entrenamiento de la plantilla es otra parte crucial del proceso de implementación, la informatización de los procesos requiere que la plantilla tenga facilidad con el uso de ordenadores. Además, muchos sistemas ERP son complejos y exigen un entrenamiento añadido que se debe llevar a cabo en un tiempo reducido.

## Mantenimiento posterior

Todas las implementaciones de ERP requieren un mantenimiento constante. La plantilla de la empresa deben participar en formación periódica para actualizar sus habilidades y prevenir estancamiento en la aplicación de automatización a nuevos problemas. Además, si la administración ha tomado atajos en la implementación, ya sea ignorando la formación o descartando datos de importancia debido a dificultades de integración, estos pueden ocasionar complicaciones e imprevistos después de la implantación.

En estos casos, las empresas deben contratar los servicios de una consultoría externa para resolver problemas y corregir la situación. La demanda actual de estos servicios, que es increíblemente alta debido a la adopción rápida de los sistemas, puede conllevar altos costes en un período de tiempo muy corto. Según el Grupo Gartner, el coste diario de un consultor externo de SAP es de USD 1600 (Bingi, Sharma, y Godla, 1999).

# Transformación de la asignación de recursos y los problemas de restricciones en empresas

---

## 3.1 Contexto

---

El caso práctico realizado en este trabajo, enfocado en la asignación de recursos, tiene como objetivo modernizar un proceso de asignación para mejorar su eficiencia y efectividad. Tal como se ha observado en apartados anteriores, los avances en el campo de la asignación de recursos han sido posibles gracias al desarrollo de nuevas tecnologías. Entender el impacto que tienen estas tecnologías en los métodos actuales de asignación es esencial para su implementación efectiva en las empresas.

Tanto en el ámbito de la tecnología como en la asignación de recursos, la revolución industrial marcó un punto de inflexión. La incorporación de maquinaria y la producción en masa exigían una mayor escala y un ritmo de producción más acelerado, justificando una necesidad creciente de asignación de recursos (Landes, 1969).

En la década de los años 1960, aparecieron las primeras computadoras, cuyo propósito era funcionar como calculadoras avanzadas. Esta capacidad de cálculo permitió la generación de bases de datos que podían procesarse a velocidades más rápidas, ayudando en la planificación. A pesar de su simpleza (estas primeras computadoras no podían realizar más que operaciones matemáticas simples), los sistemas de gestión de bases de datos empezaron a adoptarse rápidamente en la gestión de recursos (Ceruzzi, 2003).

Con la llegada de computadoras personales en la década de los 1980, las aplicaciones de gestión de recursos transformaron la manera en la que las empresas asignaban y gestionaban sus recursos. Herramientas como las hojas de cálculo y visualizadores de gráficos impulsaron a un análisis de recursos más detallado y completo.

A lo largo de la década de los 1990 y principios de los 2000, la creación y establecimiento del Internet permitieron una comunicación casi instantánea a nivel global, revolucionando la información y actualización que las empresas podían obtener sobre sus recursos. La colaboración a distancia y la división de tareas de un mismo proyecto entre equipos en regiones geográficas distintas también tuvo un gran impacto en la gestión de recursos (Castells, 2010).

En la última década, tras una explosión de acceso a la información impulsada por la creación del internet y el almacenamiento digital, fue necesario desarrollar tecnologías capaces de resumir y extraer conclusiones de estos datos. Herramientas como la inteligencia artificial están redefiniendo el enfoque de esta gestión, añadiendo valor a la infor-

mación acumulada y reforzando las decisiones que las empresas toman en su asignación (Russell, Norvig y Davis, 2010).

### 3.2 Problemas de Satisfacción de Restricciones

Los problemas de satisfacción de restricciones son problemas matemáticos que se definen como una serie de objetos cuyo estado debe cumplir con ciertas restricciones (Brailsford, Potts y Smith, 1999). Estos problemas representan el proceso de asignación de recursos, que está sujeto a las particularidades de su entorno.

La definición formal de un problema de satisfacción de restricciones (CSP, por sus siglas en inglés) incluye un conjunto de variables, las cuales pueden tomar un dominio específico de valores posibles, así como un conjunto de restricciones. Adicionalmente, un CSP puede combinarse con una función objetivo para buscar una solución óptima entre aquellas que cumplen con las restricciones. Esta categoría de problemas CSP es de particular interés en entornos empresariales, ya que no solo proporcionan una solución factible que respeta las restricciones de un sistema, sino que también pueden hallar la solución óptima.

Según Boyd y Vandenberghe en su libro "Convex Optimization", la optimización se define como "el proceso de encontrar la mejor o más eficiente manera de utilizar recursos limitados para alcanzar los objetivos de un sistema en particular. A menudo implica maximizar algo (como el beneficio, el rendimiento o la eficiencia) o minimizar algo más (como el riesgo, el coste o la pérdida)" (Boyd y Vandenberghe, 2004).

Desde una perspectiva matemática, el proceso de formulación del sistema CSP comienza con la declaración de las variables de interés (Greenberg, s.f.). Para una empresa que está realizando un estudio de sus beneficios, estas podrían ser las cantidades producidas de cada producto que la empresa ofrece. Para el ejemplo, se define a una empresa que produce dos productos,  $producto_A$  y  $producto_B$ .

Además de definir estas variables, también se establecen restricciones que limitarán los posibles valores que pueden adoptar. Dichas restricciones constituyen la base del modelo y permiten reflejar las características que estas variables tendrían en un contexto real. Como ejemplo, se podría definir una restricción que represente los recursos limitados de una empresa. Por ejemplo, se puede designar a  $C$  como la cantidad máxima de unidades que la empresa puede producir combinando ambos productos.

$$producto_A + producto_B \leq C$$

Al observar esta fórmula desde una perspectiva matemática, es posible apreciar la importancia de aplicar dominios a las variables del sistema. Por ejemplo, si  $producto_A = -C$  y  $producto_B = 2 \cdot C$ , la restricción anterior se satisface, pero el problema deja de tener sentido. De manera similar, si los productos son discretos, las variables deberán representar únicamente valores discretos. Por ejemplo, si  $producto_A$  representa automóviles, no es posible que  $producto_A = \frac{1}{2}$ , ya que la empresa estaría produciendo medio automóvil. Los límites de las variables establecidas se pueden expresar como sigue:

$$producto_A, producto_B \in \{i \mid 0 \leq i \leq C, i \in \mathbb{N}\}$$

Esta expresión matemática indica que tanto  $producto_A$  como  $producto_B$  deberán tomar un valor entero entre 0 y  $C$ .

Una vez creado el CSP, este puede ser empleado por la empresa para determinar la cantidad de recursos que se necesitará producir. Para hallar esta cantidad, será necesario

definir los beneficios unitarios de cada producto. En este escenario, la optimización a buscar sería de maximización, puesto que la meta de la empresa consiste en obtener el beneficio más elevado posible.

$$\text{beneficio}(\text{producto}_A, \text{producto}_B) = 3 \cdot \text{producto}_A + 2 \cdot \text{producto}_B$$

En este ejemplo, *beneficio* es una función con dos variables, *producto<sub>A</sub>* y *producto<sub>B</sub>*. Para cada incremento unitario de el producto A, el beneficio aumentará por 3 unidades, mientras que para el producto B, aumentará por 2 unidades.

Una vez definida la función que representa el problema de satisfacción de restricciones, existen fundamentalmente dos enfoques para buscar la solución óptima. Por un lado, se puede desarrollar una solución mediante un método de cálculo para identificar valores óptimos; es decir, analizar la función generada por las restricciones para encontrar los valores del cambio e identificar los mínimos y máximos que optimizan el resultado. Por otro lado, se pueden emplear métodos iterativos para aproximar el óptimo; es decir, empezar en un punto aleatorio de la función que cumple con las restricciones y desplazarse para encontrar el óptimo.

Se puede distinguir entre estos dos enfoques de resolución de los CSP considerando dónde se dirige el esfuerzo. La solución de cálculo se enfoca en encontrar un método de resolución único para la función, mientras que la solución iterativa dirige su esfuerzo a encontrar la función que representa el modelo.

Los avances tecnológicos de la década de los 80 tuvieron un gran impacto sobre los problemas de restricciones, proporcionando herramientas que facilitaban el método de cálculo. Sin embargo, tuvieron mucho mayor impacto en la resolución de estos problemas de manera iterativa. La principal desventaja de este método residía en la gran cantidad de cálculos necesarios para cada resolución, un obstáculo que la tecnología ha ayudado a superar (Howard, 1988).

Este enfoque permitía distinguir dos herramientas independientes que podían desarrollarse de manera autónoma. Para definir los problemas a resolver, se diseñaron lenguajes matemáticos que facilitaban la expresión de las variables, así como sus dominios y restricciones. Esto democratizaba su uso, permitiendo que una mayor cantidad de empresas y profesionales pudieran utilizarlas. Por otro lado, los "Solvers" que buscaban soluciones posibles con diversas búsquedas y óptimos de forma iterativa, incorporaban nuevas técnicas matemáticas y aprovechaban los avances tecnológicos.

La aplicación de estos fundamentos a la optimización de recursos en entornos reales llegó con el desarrollo de la "programación lineal" por Dantzig, un matemático americano que trabajaba en problemas logísticos durante la Segunda Guerra Mundial (Dantzig, 1990). Dantzig creó el método Simplex, que iteraba sobre una secuencia de soluciones posibles hasta encontrar una óptima.

### 3.2.1. Descripción de métodos

En la formulación de modelos, existen actualmente múltiples métodos y herramientas que facilitan el proceso. Las empresas cuentan con diversas herramientas para formular modelos en lenguajes sencillos y directos, que proporcionan restricciones predeterminadas. Un ejemplo de estas puede ser la restricción *todas\_diferentes* ( $x_1, \dots, x_i$ ), que dado un conjunto de variables  $\{x_1, \dots, x_i\}$ , limita la optimización a una solución donde todas las variables especificadas tomen valores diferentes.

Muchas herramientas de formulación de modelos están integradas en lenguajes de programación o ofrecen una conexión con estos para un traspaso de datos eficiente entre

ellas (Fourer, Gay y Kernighan, 2003). Los lenguajes de programación son herramientas más generalistas que permiten una amplia gama de funciones y casos de uso. Esta conexión puede facilitar la realización de análisis sobre los resultados de la optimización o integrarlos directamente en una aplicación empresarial.

Una vez que el modelo ha sido formulado e implementado en un sistema o ambiente existente, el "Solver" puede ser utilizado para encontrar las soluciones existentes y optimizar una función objetivo. Para problemas con una gran cantidad de parámetros, puede no resultar factible encontrar un óptimo real. Para estas situaciones, las herramientas ofrecen opciones para detener la búsqueda después de un cierto tiempo o cuando se haya encontrado una solución suficientemente satisfactoria.

Una vez que se ha encontrado la solución, los modelos de CSP ofrecen herramientas para presentarla en un formato que se pueda utilizar, o para integrarla con otros sistemas empresariales que puedan aprovecharla. Algunas herramientas ofrecen la funcionalidad para explorar y modificar el proceso de búsqueda de la solución (Williams, 2013), aunque estas suelen tener una capacidad limitada.

Es común que el modelo propuesto, y consecuentemente la solución encontrada, no se ajuste a las necesidades de un departamento o de la empresa. Para esto, es indispensable llevar a cabo revisiones de los modelos en un proceso iterativo, con el objetivo de alcanzar una solución que sea verdaderamente útil para la empresa. Algunos sistemas ponen a disposición herramientas de análisis de modelos para facilitar este proceso. Estas herramientas pueden evaluar la factibilidad del modelo y proporcionar datos adicionales que ayuden a optimizar la solución.

### 3.2.2. Aplicación en empresa

En la optimización de procesos a través de la tecnología, es crucial identificar las áreas que requieren mejoras y evaluar si dichas optimizaciones serían beneficiosas. Este análisis debe incluir una evaluación de costes, teniendo en cuenta factores como la reducción de gastos, el incremento en eficiencia y una utilización más efectiva de los recursos. Los procesos que más se benefician de estas optimizaciones suelen ser aquellos que involucran numerosos recursos o que tienen un significativo impacto en los resultados empresariales. Además, es importante tener en cuenta la escala y complejidad de los problemas, ya que en algunos casos pueden resultar en modelos excesivamente complejos con soluciones óptimas difíciles de hallar.

Estos modelos pueden tener un impacto significativo en los procesos empresariales. Muchos de estos procesos cumplen con los requisitos de manejar cantidades reducidas de datos y tener una alta complejidad computacional (Tsang, 2002):

- **Cadena de suministros y logística:** Los problemas de satisfacción de restricciones puede aplicarse a procesos como enrutamiento, planificación horaria, manejo de inventario y planificación de capacidad. Para estos casos, la optimización busca una reducción de coste y mejor utilización de los recursos.
- **Cadena de producción:** Debido a sus plazos ajustados y alta rotación, la cadena de producción puede beneficiarse enormemente de modelos de restricciones. Mediante estos, se puede llevar a cabo una planificación que maximice los beneficios sin alterar la producción, y que considere restricciones como limitaciones de capacidad, así como la disponibilidad de material y personal. A pesar de su aparente simplicidad, estas herramientas son capaces de modelar y optimizar sistemas como la disposición de una planta de fabricación, a través de restricciones que definen los parámetros.

- **Planificación horaria:** En la planificación horaria los CSP pueden modelar restricciones complejas como preferencias individuales de las personas, límites horarios, descansos reglamentarios y plazos para cumplir la demanda. Estas mejoras de eficiencia pueden llevar a mayor satisfacción con el trabajo, y eliminar cargas de planificación a departamentos de recursos humanos y administración.
- **Marketing y ventas:** Estos modelos pueden utilizarse para asignar eficientemente los recursos de marketing y ventas, tal como determinar la mezcla de marketing óptima para maximizar el éxito del producto o establecer los precios de los productos adecuadamente.

### 3.2.3. Otras consideraciones

A pesar de la expresividad de los modelos y la naturalidad de definir un sistema por las normas que lo rigen en lugar del proceso de su funcionamiento, estas herramientas presentan una alta complejidad de uso. Durante mucho tiempo, su limitación de funcionalidad no provenía de la capacidad de la tecnología que las ejecutaba, sino de la dificultad para expresar problemas de alta complejidad. Estos modelos requerían múltiples revisiones en colaboración con la empresa para añadir restricciones y obtener los resultados deseados. Sin embargo, la detección de fallos e ineficiencias en este proceso generaba costes adicionales que, en muchos casos, volvían inviable la implementación (Macal y North, 2010).

Además, existen otros métodos que se han desarrollado a partir de la programación lineal para incorporar modelos más complejos, como la programación no lineal y la programación entera. En la programación no lineal, existen elementos no lineales en la función objetivo o en las restricciones. Un ejemplo de esto sería una restricción con un aumento cuadrático por cada incremento en la variable.

La programación entera utiliza números enteros para las variables, representando cantidades discretas como la cantidad de productos manufacturados en un proceso industrial o su duración en horas completas. Estos modelos permiten optimizar problemas de programación en producción y logística, donde las cantidades de recursos no pueden ser fraccionarias.

Existen también otros métodos de optimización como la optimización heurística y metaheurística, utilizados para obtener soluciones aproximadas a problemas complejos de optimización. Estos métodos, diseñados para afrontar modelos de alto tamaño o complejidad, utilizan distintos algoritmos para modificar las iteraciones de búsqueda de solución, permitiendo aproximar óptimos de modelos difíciles de resolver con programación lineal (Talbi, 2009).

El caso práctico de asignación de recursos realizado en este TFG pertenece a esta categoría de problemas, ya que busca formular un modelo de satisfacción de restricciones para optimizar un proceso de asignación horaria, encontrando una solución más eficiente y reduciendo los costes en recursos humanos necesarios para su realización. Como se ha demostrado en esta sección, este tipo de procesos son muy comunes en el funcionamiento de una empresa, dado que surgen cuando es necesario coordinar una serie de tareas que presentan restricciones variadas.

Debido a esto, la exploración de las posibles soluciones para este tipo de problemas puede traer beneficios significativos a una gran proporción de empresas, tanto en costes derivados de la eficiencia y efectividad de los procesos como en la satisfacción de clientes y plantilla.

### 3.3 Automatización y eficiencia

---

A pesar de todas las herramientas y modelos que los ordenadores han ofrecido en su evolución desde sus orígenes, en esencia siempre han sido instrumentos de automatización simple. Es decir, permiten a las personas realizar tareas de manera más rápida y fiable.

Además de mejorar la optimización y el análisis, los avances tecnológicos tienen un impacto significativo en la velocidad con la que el personal de una empresa puede realizar sus tareas. Estas mejoras buscan perfeccionar los procesos y mejorar la obtención de información.

La automatización robótica de procesos (RPA) se define por la asociación de normas del IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) como "una instancia de software preconfigurada que utiliza reglas empresariales y coreografía de actividades predefinidas para completar la ejecución autónoma de una combinación de procesos, actividades, transacciones y tareas en uno o más sistemas de software no relacionados para entregar un resultado o servicio con gestión de excepciones humanas".

Es decir, RPA es un producto software que permite a las empresas automatizar ciertos procesos de larga duración que suelen tener características repetitivas. De manera similar a un humano, este software puede interpretar una pantalla, seleccionar la secuencia correcta de teclas y botones en respuesta, y ejecutar procesos importantes en una fracción del tiempo. Sin embargo, a diferencia de las personas, este enfoque tecnológico no mejora su rendimiento con el tiempo ni busca optimizar los procesos que lleva a cabo, más allá de ejecutar las mismas funciones con mayor rapidez.

#### 3.3.1. Características de los procesos automatizados

Un proceso automatizable con RPA debe seguir cuatro características principales:

1. **Poder definirse a través de reglas:** Debe haber una serie de pasos marcados en la ejecución del proceso que puedan traducirse a órdenes definidas.
2. **Tener un volumen de trabajo elevado:** Para que los costes fijos de la automatización, como la implantación de la tecnología, el software utilizado y el mantenimiento posterior, mejoren la rentabilidad del proceso, es necesario que el tiempo ahorrado por la automatización sea considerable.
3. **Activación por disparadores digitales:** Las tareas deben llevarse a cabo tras la ocurrencia de eventos digitales, como la llegada de un correo o recepción de una señal de una máquina. Las aplicaciones RPA pueden iniciarse automáticamente en respuesta a estos eventos.
4. **Datos digitalizados:** Aunque existen procesos RPA que digitalizan datos analógicos, es ideal que estos se encuentren en formato digital, ya que así pueden ser leídos y procesados por el software con mayor precisión.

Además, es importante que los procesos automatizados mantengan una estructura constante y poco cambiante, ya que cualquier variación en el entorno podría implicar costes adicionales de mantenimiento para actualizar las reglas del proceso e incluso, en algunos casos, diseñar uno nuevo.

### 3.3.2. Ventajas del enfoque RPA en las empresas

La versatilidad del enfoque RPA y el grado de digitalización en las empresas modernas hace que este sea extremadamente aplicable en casi cualquier industria. Según una encuesta de personas con trabajos de oficina de 2021 realizada por UiPath, Inc., una empresa líder en software RPA, estas personas perdían unas 5 horas a la semana en tareas automatizables.

Los costes de capital humano muchas veces son los más grandes en los que incurren las empresas. Delegando tareas repetitivas a RPA, el personal empleado puede concentrar sus esfuerzos en actividades que produzcan un mayor valor añadido al producto. Según PwC (s.f.), el 45 % de las tareas laborales pueden ser automatizadas, lo que podría ahorrar una cantidad estimada de USD 2 billones en costes laborales globales.

Estas plataformas RPA se pueden dividir en dos categorías: RPA atendido, que colabora junto con la persona para alternar entre las partes automatizables del proceso y aquellas que requieren intervención humana; y RPA no atendido, que ejecuta el proceso entero de manera completamente automatizada.

Estas mejoras en la gestión de recursos humanos en las empresas puede desembocar en una variedad de mejoras a nivel empresarial en diferentes ámbitos de la actividad:

- **Rentabilidad:** La eliminación de tareas repetitivas permite a las personas empleadas aportar un mayor valor añadido. La conversión de procesos a normas predefinidas puede reducir el error humano en estos, reduciendo los puntos posibles de ataque y mejorando la seguridad informática del sistema.
- **Satisfacción del cliente:** La incorporación de chatbots en la interacción del cliente con la empresa puede optimizar la resolución de problemas, permitiendo que los técnicos se centren en problemas más graves. Además, la disminución de errores en el proceso productivo, gracias a tareas automatizadas, también puede contribuir a mejorar la imagen de la compañía.
- **Análisis:** La mejora en la calidad de los datos gracias a las tecnologías RPA, las cuales reducen errores y automatizan la extracción de datos, contribuye a un análisis más amplio y robusto.
- **Bienestar del personal empleado:** Las tareas repetitivas reducen el bienestar de las personas, la eliminación de estas lleva a mejoras de satisfacción con el trabajo y la compañía. Una encuesta realizada por Salesforce en 2021 mostró que, como resultado de la implementación de RPA, el 89 % de las personas empleadas están más satisfechas con su trabajo y el 84 % están más satisfechas con su empresa.

### 3.3.3. Limitaciones del enfoque RPA en las empresas

Aunque la tecnología RPA promete ahorros significativos y es fácil de implementar, la sencillez inherente de su función implica ciertas limitaciones:

- **La regla de 5:** La automatización RPA tiende a fallar cuando los procesos que debe realizar sobrepasan 5 tareas simples.
- **Altos costes y resistencia al cambio:** A pesar de los ahorros que puede generar, una implementación RPA conlleva unos costes altos iniciales. Las modificaciones a sistemas RPA también generan costes adicionales considerables.

- **Datos no estructurados:** La automatización falla cuando tiene que tratar con datos no estructurados. Estos pueden incluir textos escritos, vídeos y otros formatos de datos que requieren limpieza y categorización antes de su uso.
- **Dificultades de crecimiento:** Los procesos automatizados con RPA necesitan coordinación y consistencia desde sus distintas fuentes de datos para mantener su funcionamiento. Esto puede ser difícil de compaginar con los cambios que exige el crecimiento.

### 3.4 Comunicación y colaboración

---

La llegada de las redes de computadores y el Internet marcó un gran cambio en la asignación de recursos. La capacidad de conectar personas y sistemas en tiempo real sin consideraciones geográficas permitía a las organizaciones unir sus sistemas de asignación para crear entornos con mayor interconexión.

La consecuencia directa de este cambio tecnológico se reflejaba en mejoras en la comunicación: las empresas podían tomar decisiones y responder a variaciones con rapidez y eficacia. Esta mayor comunicación generaba una mayor cantidad de datos disponibles, y por lo tanto, sistemas que podían incluir más factores en sus decisiones.

Además de mejoras en la comunicación y la obtención de datos, esta vía de transmisión ha permitido la creación de plataformas en línea y sistemas digitales utilizados para automatizar y optimizar la asignación de recursos. Estos sistemas pueden pertenecer a una empresa externa, que ajusta sus precios según los datos almacenados y la computación realizada. Las organizaciones pueden utilizar estos sistemas para asignar tareas, realizar seguimiento, recopilar datos de la actividad y analizar los resultados de manera escalable y descentralizada, lo que permite obtener una mayor rentabilidad de la tecnología disponible.

Las ventajas del uso de estas tecnologías no están relacionadas únicamente con la implementación de métodos de optimización para mejorar la producción, o con análisis que conduzcan a una mejora en la toma de decisiones. También están asociadas con la rapidez y el alcance con los que estas optimizaciones pueden llevarse a cabo en todos los niveles de la empresa.

#### 3.4.1. Ventajas de los sistemas de comunicación en las empresas

Las diversas aplicaciones de estas tecnologías se orientan a potenciar la comunicación, la colaboración y la eficiencia en los procesos. Los efectos de las redes de computadoras en el ámbito empresarial pueden manifestarse de distintas formas (Feng, 2007):

- **Sistemas de comunicación humana:** Los sistemas de comunicación, como el correo electrónico, las aplicaciones de mensajería instantánea y las videoconferencias, han revolucionado la comunicación interna y externa en las empresas. Gran parte del proceso de asignación de recursos depende de estas comunicaciones, las cuales aportan flexibilidad y eficiencia a la comunicación.
- **Colaboración en línea:** Las herramientas de colaboración en línea y los documentos compartidos han revolucionado la forma en que los equipos colaboran en la realización de proyectos. Estos recursos compartidos ofrecen una mayor versatilidad de uso y rapidez en las modificaciones. La posibilidad de que múltiples personas trabajen simultáneamente en proyectos puede cambiar radicalmente la planificación de estos.

- **Almacenamiento de datos:** Aunque la necesidad de sistemas de comunicación en el almacenamiento de datos pueda no ser aparente, estos son imprescindibles para garantizar un almacenamiento eficiente y escalable. Mediante estos sistemas de comunicación, las empresas pueden automatizar este almacenamiento sin necesidad de contar con infraestructura propia para ello. Además, permiten recuperar los datos de manera rápida y organizada, lo cual facilita la toma de decisiones y la adaptación a cambios en el entorno.
- **Computación en la nube:** La computación en la nube permite externalizar los servicios de computación a otras empresas, manteniendo las aplicaciones y datos de manera constante, fluida y transparente para la empresa. Los modelos como Infraestructura como Servicio (IaaS), Plataforma como Servicio (PaaS) y Software como Servicio (SaaS) (Qian, Luo, Du y Guo, 2009), permiten a las empresas acceder a recursos de alta potencia computacional y almacenamiento bajo demanda. Estos sistemas reducen la necesidad de realizar inversiones elevadas e ineficientes en infraestructura propia, y aumentan la flexibilidad y digitalización de los procesos de gestión de recursos de las compañías.

### 3.4.2. Otras consideraciones

La implementación de estas tecnologías de comunicación es muy importante para las empresas, por lo que deben adoptar un enfoque centrado en la seguridad y la privacidad. En este sentido, las empresas deben implementar políticas activas de acceso a la información que minimicen los riesgos de un sistema vulnerable a ataques externos. Es fundamental permitir a las personas y a los procesos acceder solo a la información necesaria para desempeñar sus actividades, en lugar de a toda la información disponible (Andress, 2014). Además, puede ser beneficioso capacitar a todo el personal en la detección de posibles ataques y amenazas a los sistemas, ya que muchas veces se identifican puntos de ataque a través de estos.

Es importante considerar los límites prácticos del almacenamiento de información tanto para la optimización de los sistemas como para el análisis del personal empleado. Una sobrecarga de información, ya sea a través de mensajes internos, correos electrónicos, formación o cualquier otro medio interno o externo, puede provocar efectos adversos, como el rechazo a la tecnología y un aumento del estrés (Edmunds y Morris, 2000). De manera similar, el almacenamiento excesivo de datos sobre la actividad puede dar lugar a bases de datos demasiado grandes para llevar a cabo un análisis coherente, entorpeciendo la toma de decisiones empresariales.

Los grandes avances en virtualización que permiten estas herramientas, junto con el cambio cultural hacia cada vez más herramientas digitales, deben abordarse desde una perspectiva empresarial, teniendo en cuenta las diferencias generacionales en la familiaridad con estas tecnologías. Para evitar la discriminación por edad y los fracasos en la adopción, es crucial ofrecer una formación adecuada que tenga en cuenta estas posibles diferencias. Además, es esencial desarrollar herramientas que consideren estas variaciones en el conocimiento al definir sus casos de uso.

## 3.5 Procesamiento y análisis de datos

---

En los primeros apartados de este capítulo, la tecnología asumía el papel de un sistema de apoyo para el cálculo. Sin embargo, se ha explorado cómo su alcance se ha extendido a más aspectos del proceso de asignación empresarial. Dado su diseño como

herramienta estática, todas las implementaciones analizadas compartían una serie de limitaciones inevitables. Entre estas, destacan una falta de flexibilidad, dificultades para adaptarse a entornos cambiantes y una incapacidad para manejar datos que no tienen formatos consistentes o categorización adecuada.

En los últimos años, los métodos de asignación de recursos han abordado estas limitaciones con dos herramientas que han sido posibles gracias a los avances tecnológicos recientes: una explosión en la cantidad de datos obtenidos en todas las facetas de los negocios y servicios altamente escalables con gran capacidad de computación y la habilidad para procesar dichos datos.

La inteligencia artificial se basa en modelos algorítmicos que resuelven problemas específicos, utilizando una gran cantidad de datos para encontrar patrones y soluciones óptimas a los objetivos buscados. Esto difiere considerablemente de los modelos de optimización vistos anteriormente. Aquí, el modelo propuesto no consiste en una representación de la realidad, sino que dicha realidad está representada dentro de los datos introducidos en él. El modelo únicamente busca las relaciones entre estos datos, de tal manera que justifiquen el resultado que se desea obtener.

Conceptualmente, en el ámbito de las decisiones empresariales, estos nuevos modelos buscan las razones detrás de los datos que la empresa obtiene. Es decir, frente a una distribución de recursos y ciertos resultados empresariales, estos modelos analizan las combinaciones de recursos que han llevado a dichos resultados.

La particular forma en que los modelos mejoran su capacidad de razonamiento a medida que reciben más datos, los sitúa como la herramienta ideal para resolver un tipo específico de problemas. Estos problemas son aquellos que requieren la identificación de patrones complejos en grandes volúmenes de datos, teniendo en cuenta en el análisis detalles que un analista humano tendría que resumir e ignorar.

### 3.5.1. Descripción de métodos

La inteligencia artificial, y más concretamente el campo del aprendizaje de máquina (Mitchell, 2007), puede simplificarse en su funcionamiento a una regresión. Es decir, el modelo toma como base unos datos y una categorización, e intenta ajustar a ellos una función matemática de la mejor manera posible.

El concepto de "Inteligencia Artificial", fuera de los ámbitos informáticos, suele referirse a una técnica específica dentro del campo de aprendizaje de máquina: las redes neuronales de aprendizaje profundo. Esta herramienta realiza una categorización similar a una regresión, pero en su proceso genera entradas de datos formadas por combinaciones de los datos iniciales. Al acumular estas capas de datos generados, logra expresar conceptos complejos a partir de datos simples.

En un contexto empresarial, se podría considerar un modelo optimizado para identificar la combinación de recursos que traería el mayor beneficio a una empresa. En una implementación de análisis sencillo, el modelo podría determinar una combinación de procesos de tal manera que incrementara la rentabilidad. En una red neuronal de aprendizaje profundo, una de estas capas de combinaciones podría distinguir si la empresa se encuentra en una situación de diferenciación de Porter o de liderazgo en costes, y recomendar la combinación adecuada para maximizar la estrategia particular en la que la empresa se halla.

Una limitación de estas herramientas es su incapacidad para explicar el origen de sus razonamientos. Debido a que, en esencia, las conclusiones se basan en combinaciones de datos y no en un modelo definido, es imposible saber si sus conclusiones se sustentan

en principios sólidos, coincidencias o sesgos en los datos. Siguiendo el ejemplo anterior, un analista humano justificaría la estrategia de ventaja competitiva en sus conclusiones, otorgándoles validez. Mientras tanto, una red neuronal simplemente mostraría sus recomendaciones en la gestión de recursos, sin una explicación que pueda respaldar su razonamiento.

### 3.5.2. Aplicación en empresa

El potencial de aplicación de la IA en la empresa se extiende a todos los procesos donde se pueda generar una rentabilidad optimizando y previniendo estados futuros, y donde exista una amplia cantidad de datos categorizados.

Dentro de cada departamento en una empresa se pueden encontrar múltiples procesos que cumplen con estas normas:

#### Previsión de demanda

La capacidad de previsión es una de las herramientas más utilizadas en la IA. Esto se debe al ahorro de costes que puede aportar la eliminación de incertidumbres en el entorno empresarial. Otro factor importante en la rápida adopción de esta aplicación a todos los niveles organizativos es la facilidad de obtención de información. En este caso, la demanda puede provenir de factores externos a la compañía y diferentes empresas pueden tener patrones similares de demanda. Es en gran parte debido al uso de esta herramienta que las compañías compran y venden grandes cantidades de información comercial, aunque esta no provenga directamente de su actividad (Bocij, Greasley y Hickie, 2008). La previsión de la demanda puede proporcionar información valiosa en diferentes niveles de la empresa:

- **Gestión de Inventarios:** La previsión de demanda puede facilitar la toma de decisiones en la reposición y fabricación del producto.
- **Asignación de personal:** En entornos de servicio, la previsión de demanda permite repositionar el personal preventivamente para responder a picos de demanda.
- **Planificación de la cadena de suministro:** La previsión de demanda puede avisar de problemas futuros, permitiendo una reacción rápida.

#### Optimización de recursos

El uso de la IA para optimización de recursos ha demostrado ser una aplicación decisiva para la gestión de empresas de gran tamaño, facilitando la escalabilidad en los distintos procesos de producción de valor:

- **Marketing y publicidad:** La IA puede analizar el comportamiento de los clientes y encontrar patrones que lleven a ventas, permitiendo a la empresa asignar eficientemente el presupuesto de publicidad.
- **Recursos financieros:** La optimización de recursos financieros, previniendo ingresos y gastos futuros y caracterizando los recursos.
- **Gestión de personal:** La optimización de procesos, como la contratación y la distribución del personal, puede permitir a la empresa mayores grados de escalabilidad en procesos donde esta suele presentar dificultades.

### Programación y mantenimiento

Con los costes a tecnología de sensores y IoT cada vez más asequible (Madakam, Ramaswamy, y Tripathi, 2015), es razonable para las empresas integrar tecnologías IA en el proceso productivo:

- **Mantenimiento:** Las redes neuronales pueden prever cuándo es probable que un equipo falle y programar un mantenimiento preventivo.
- **Detección de errores:** De manera similar, la IA puede reconocer errores en el proceso productivo y fácilmente encontrar la fuente del error.
- **Optimización de cadena de producción y transporte:** La IA puede ser utilizada para optimizar el proceso de producción y la entrega del producto, evaluando la distribución en la fábrica y determinando las rutas de entrega más eficientes.

#### 3.5.3. Otras consideraciones

Los casos de uso que se han descrito superan las limitaciones evidentes de falta de flexibilidad y adaptación al cambio en otras tecnologías de asignación de recursos. Sin embargo, estos modelos son limitados en su alcance, ya que se entrenan para un propósito específico y no son capaces de intuir factores externos a su entrenamiento inicial. Para ilustrar esta limitación, se puede utilizar el ejemplo práctico visto al principio de esta sección: una empresa que ha entrenado su modelo para maximizar el beneficio. Si esta empresa se dedicara a la producción de automóviles y quisiera que la red neuronal anterior pudiera incluir consideraciones sobre el montaje de un motor en sus cálculos de beneficio, esto no sería posible. Las redes neuronales disponibles no tienen la capacidad de interrelacionar el funcionamiento de un motor con los beneficios de una empresa, ya que esto requeriría habilidades añadidas que tendrían que ser proporcionadas por una persona con formación en ambos ámbitos.

En los meses previos a este trabajo, se han producido avances en los modelos de inteligencia artificial que han impulsado el progreso tecnológico en este campo. Estos avances buscan otorgar a estos sistemas un conocimiento generalizado, lo que les permitiría aplicar principios de análisis a situaciones que no se habían incluido previamente en su entrenamiento (Floridi, Chiriatti, 2020). Aunque estos sistemas aún no han alcanzado lo que se denomina "inteligencia artificial general" (Goertzel, 2014), no cabe duda de que esta tecnología revolucionaría todos los procesos de gestión de recursos en las empresas.

#### 3.5.4. Ética de uso

Todas las aplicaciones de la IA que se han considerado, definen su uso como una herramienta. Esta distinción es imprescindible para el uso correcto de la tecnología, así como para los desarrollos proyectados para el futuro. La mejor manera de aplicar la IA es a través de una colaboración entre el profesional y la herramienta. Los modelos buscan conclusiones complejas en los datos y puntos de optimización, pero es la persona quien utiliza estas conclusiones para realizar juicios profesionales que desembocan en las acciones tomadas. La IA no sustituye a la persona, sino que amplifica y mejora sus funciones.

Una limitación significativa de estas tecnologías predictivas radica en el sesgo que puede estar presente en sus datos de entrenamiento. Si hay un sesgo en la información histórica que el modelo ha utilizado para aprender ciertos patrones, no sólo perpetuará

estos sesgos, sino que también los reconocerá como patrón y los replicará en sus predicciones (Tasioulas, 2022). Este problema no tiene una solución evidente: incluso si se intenta eliminar la información sesgada, las herramientas de razonamiento que el modelo usa para inferir relaciones entre diferentes datos pueden seguir propagando el sesgo.

Además, aunque los datos que se utilicen no provengan de una fuente histórica y sean generados por el modelo, existen otros problemas que podrían generar disparidades en el análisis. Por ejemplo, pueden surgir ciclos de refuerzo negativo, independientemente del sesgo. Supongamos que una inteligencia artificial detecta un alto número de errores en un determinado departamento, lo que desencadena una investigación por parte de la administración. Si el departamento está pasando por dificultades, es probable que dicha investigación descubra aún más fallos. Esto puede resultar en un cambio en el entorno, reforzando un ciclo negativo en el que la inteligencia artificial asigna una mayor probabilidad de error a ese departamento, mientras que puede ignorar fallos en otros departamentos (Gillespie, 2020).

Estos problemas no tienen una solución directa. Para mitigar este sesgo, las herramientas de inteligencia artificial deben complementarse con análisis especializados en la detección de posibles sesgos. Los resultados deberán evaluarse contrastándolos con estas herramientas (Barocas, Hardt y Narayanan, 2023).

---

---

## CAPÍTULO 4

# Propuesta

---

### 4.1 Análisis del problema

---

#### 4.1.1. Oportunidad de innovación

La defensa de los Trabajos Fin de Grado en la Facultad de Administración y Dirección de Empresas de la UPV se realiza en cinco convocatorias con una duración de tres o cuatro días. Para presentarse a la defensa, el alumnado deposita su trabajo dos semanas antes del comienzo de las defensas. Durante estas dos semanas se debe elaborar un horario para la defensa de los Trabajos Fin de Grado. El proceso de depósito está ilustrado en la figura 4.1.

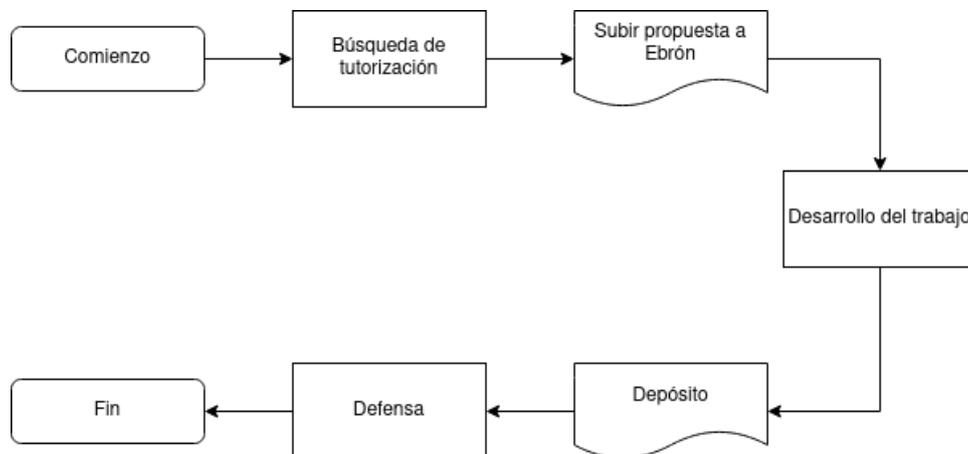


Figura 4.1: Diagrama de flujo representando el proceso de depósito del alumnado

Antes de la planificación, se organizan diversas parejas de docentes, en las cuales, en cada pareja, una persona asume el papel de presidencia y la otra de secretaria. En esta organización, el puesto de secretaria debe ser asignado a la persona con menos antigüedad y de menor rango.

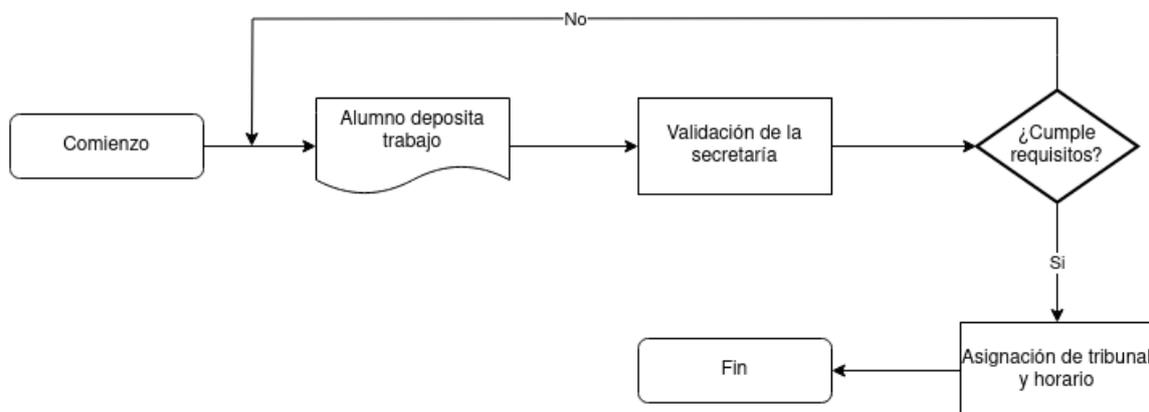
La creación del horario para la defensa de los trabajos trae una serie de dificultades que son comunes para cualquier planificación de plantilla en un entorno empresarial. Estas restricciones son:

- **Tiempo acotado.** Las defensas deben realizarse en las fechas establecidas. Esta limitación temporal es muy común en el entorno empresarial, donde los proyectos deben finalizarse dentro de un plazo determinado para su entrega al cliente.

- **Restricciones horarias.** Los tribunales encargados de evaluar los distintos trabajos presentados tienen una disponibilidad semanal que limita las horas en las que pueden asistir a las defensas. De manera similar, en una empresa, cada miembro del equipo puede tener limitaciones horarias que deben ser tenidas en cuenta durante la planificación.
- **Combinaciones de docentes.** Los tribunales están integrados por docentes que también pueden tutorizar trabajos o ser convocados para defensas individuales. Es imprescindible que la planificación tenga en cuenta estos casos y alinee los horarios de los tribunales con las defensas para evitar conflictos. En la planificación de proyectos para empresas, las restricciones de este tipo también son habituales, dado que en numerosas ocasiones, distintos departamentos y equipos participan en el mismo proyecto y deben coordinar sus horarios.
- **Descansos y duraciones.** El horario asignado deberá tener en cuenta los descansos adecuados cuando una persona ha participado en varias defensas consecutivas, ya sea como tutor o como miembro del tribunal. Cualquier asignación de horario en una empresa debe considerar y priorizar los periodos de descanso del personal.

En este caso, el proceso identificado para la innovación es la asignación horaria de estas defensas. Dada su naturaleza como tarea, el entorno en el que se encuentra no presenta muchos cambios. Esto significa que el proceso automatizado no requeriría demasiado mantenimiento y podría adaptarse fácilmente a las pequeñas variaciones que el problema podría presentar en el futuro.

El diagrama de flujo mostrado en la figura 4.2 muestra el proceso de presentación al periodo de defensas para un Trabajo Fin de Grado.



**Figura 4.2:** Diagrama de flujo representando el proceso de defensa para un trabajo

La innovación aplicada a estos problemas en un contexto de negocio presenta numerosas oportunidades. La planificación manual conlleva un tiempo considerable para ser generada, y su automatización podría resultar en un ahorro significativo en recursos humanos. Con la implementación adecuada, el sistema realizaría una asignación instantánea de horarios, asegurando el cumplimiento de todas las restricciones.

#### 4.1.2. Naturaleza del problema

Este problema se enmarca dentro de un problema de satisfacción de restricciones (CSP), dado que se dispone de una serie de restricciones y un objetivo definido. En el

caso más básico, el modelo deberá generar un horario en el que todas las defensas se lleven a cabo, el trabajo se reparta equitativamente entre los tribunales existentes, no exista solapamiento de horarios y se respeten los descansos necesarios.

Sin embargo, este problema también se plantea desde una perspectiva relevante en la asignación de recursos empresariales: la optimización del proceso. Todas las soluciones posibles son válidas dentro de las restricciones propuestas, pero, ¿existe alguna diferencia de calidad entre ellas? Para esta implementación, consideramos el bienestar de los tribunales como un factor, analizando cómo minimizar su tiempo perdido. En un contexto empresarial, equipararíamos este tiempo perdido a costes adicionales para el proyecto o la tarea.

Para minimizar este factor de coste, se plantea el problema desde dos perspectivas paralelas de optimización:

- Minimizar el tiempo de descanso, sin infringir el mínimo establecido por las restricciones, para reducir el tiempo total que el profesorado tiene que esperar entre las defensas.
- Es necesario minimizar los días en los que un tribunal debe asistir a las defensas. En este caso, consideramos que cada día de defensa implica un coste fijo para los miembros del tribunal. Por lo tanto, para reducir este coste y evitar horarios dispersos de los tribunales, se requiere una estrategia de planificación eficaz.

Al combinar estos objetivos de optimización con el problema de satisfacción de restricciones, no solo se mejora la eficiencia del proceso de asignación, sino también su efectividad.

#### 4.1.3. Especificación de requisitos

Existen tres estructuras básicas en el problema: las solicitudes de defensa, los tribunales, y la disponibilidad horaria de los tribunales.

Las solicitudes de defensa son presentadas por un miembro del alumnado que desea defender su trabajo de fin de grado. Estas solicitudes vienen acompañadas de información adicional, de la cual el sistema requiere:

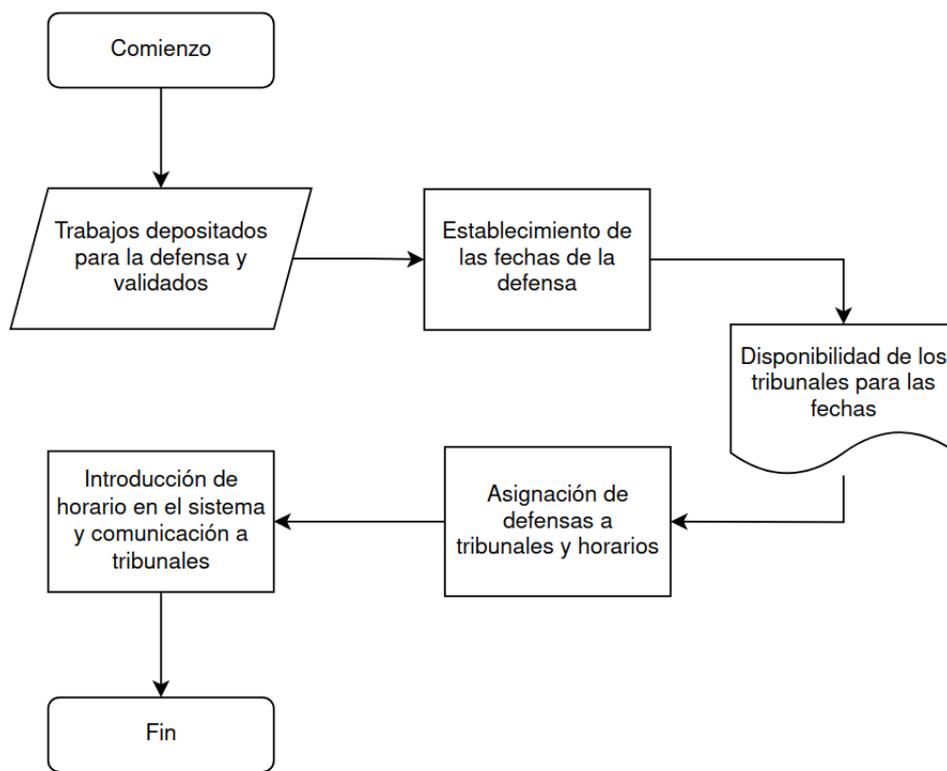
- Nombre y apellidos de la persona depositante, así como la que tutoriza y co-tutoriza el trabajo. El papel de cotutor es opcional, se añade en los trabajos tutorizados por dos miembros del profesorado.
- Idioma
- Título del TFG
- Vocal y suplente propuestos por la persona que tutoriza el trabajo

Una vez la secretaría de la facultad ha validado que toda la documentación es correcta, y que se cumplen los requisitos para poder depositar, comienza el proceso de la asignación del tribunal. Además de la presidencia y secretaría de la defensa que se deben asignar por el sistema, los trabajos van acompañados de miembros del profesorado adicionales, estos son el tutor, cotutor, vocal titular y vocal suplente.

Además del vocal obtenido del informe del depósito, los tribunales están compuestos por dos docentes adicionales que toman el papel de presidencia y secretaría. Estos pares que conforman el tribunal se establecen al comienzo del curso, asegurándose de que

se cumplen los requisitos de antigüedad y cargo. Posteriormente, son seleccionados en orden del listado de pares generados para cada sesión de defensa.

Este proceso se ilustra en la Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Diagrama de flujo representando el proceso de las defensas para la administración

La restricción fundamental del problema es que todo el profesorado participante en cada defensa sea distinto. Es decir, que para un mismo trabajo presentado para defensa, una persona no puede ejercer el rol de tutor y miembro del tribunal, o que un presidente o secretario, tenga asignado también el rol de vocal. Es posible que el profesorado que forme parte de un tribunal también esté involucrado en una defensa particular, y en este caso el sistema deberá asegurar que el tribunal donde se encuentra no se asigna a ese trabajo, para evitar posibles incompatibilidades en el tribunal.

Antes de la asignación, y dado que las fechas de defensa suelen coincidir con otras obligaciones laborales de los miembros del tribunal, se les pide que indiquen su disponibilidad horaria, marcando para las fechas previstas de defensa los intervalos durante los cuales pueden asistir.

#### 4.1.4. Análisis de riesgos

El destinatario del sistema será el administrador de la facultad de Administración y Dirección de Empresas (ADE), encargado de llevar a cabo la asignación de las defensas. El formato de los datos y la necesidad de intervención humana hacen que no sea posible una automatización total del proceso. Por ello, se debe considerar la facilidad de uso y la integración del modelo en el flujo de trabajo, para mitigar posibles riesgos durante su incorporación.

Aunque el formato del problema es bastante estático, los cambios generales en el sistema de defensas de trabajos fin de grado quedan al margen de las consideraciones de

implementación. Surge una necesidad de flexibilidad, dado que las restricciones están directamente vinculadas con los horarios del personal docente. Por esta razón, el sistema debe incorporar la flexibilidad necesaria para adaptarse a variaciones en estos horarios, sin renunciar a las ventajas de la asignación y automatización.

#### 4.1.5. Presupuesto

En esta sección se analizan los diversos factores de coste que se considerarían al resolver este problema desde la perspectiva empresarial. Existen tres fuentes principales de coste para la automatización de todos los procesos empresariales, las cuales son:

- Coste de los sistemas utilizados: De manera general, este coste se encuentra reflejado en el servicio de planificación de recursos empresariales (ERP) que la empresa emplea. En el contexto de este problema específico, el coste derivaría del algoritmo "Solver" utilizado para su resolución. En entornos no académicos, la mayoría de estos algoritmos se ofrecen como un producto software donde se paga por su uso.
- Desarrollo del modelo: Generalmente, este coste se refiere a los pagos realizados a empresas de informática para la implementación del producto. Estos costes pueden abarcar también las posibles reuniones con la administración para realizar la formulación del problema, además de cualquier mantenimiento posterior requerido.
- Capacitación de usuarios: En las empresas, este coste suele reflejarse en pagos a consultorías externas encargadas de capacitar a aquellas personas que interactuarán con el nuevo sistema. Para este caso particular, el coste de capacitación variaría dependiendo de los datos recibidos. Con datos menos flexibles, la administración podría ejecutar el modelo para obtener las soluciones sin necesidad de comprender su comportamiento. No obstante, si los detalles del problema cambian, sería necesario que la administración cuente con conocimientos básicos sobre el funcionamiento del modelo, para poder realizar las modificaciones necesarias o descartar los datos problemáticos.

#### Secciones de un Sprint

Para hacer una estimación del coste de desarrollo del modelo, se enmarcarán las horas de trabajo en la metodología utilizada de Sprint. En cada Sprint se establece el siguiente ciclo de trabajo:

1. Reunión con la administración: Esta reunión sirve para consultar con la administración los objetivos del próximo prototipo, además de revisar los resultados del Sprint anterior. En este espacio, la administración puede proporcionar explicaciones más detalladas sobre los distintos aspectos del problema, y también revisar los resultados de la implementación para asegurarse de que se ajustan a sus necesidades. Dada la naturaleza tecnológica del problema y la capacidad tanto de la administración como de los miembros del equipo técnico para llevar a cabo la implementación, estas reuniones pueden realizarse mediante videoconferencias. Desde la preparación de la reunión hasta la redacción de las conclusiones, esta sección del Sprint puede durar entre 2 y 5 horas. La comunicación no necesita ser llevada a cabo necesariamente por el equipo de desarrollo de la aplicación; en muchas ocasiones, la empresa informática contará con profesionales especializados en la comunicación con el cliente que actuarán como intermediación en este proceso. Es importante resaltar

que esta parte del proceso conlleva un coste para la administración, ya que también deberá participar en la reunión, invirtiendo entre 1 y 3 horas en cada Sprint.

2. Establecimiento de requisitos técnicos: tras la reunión con la administración para un Sprint específico, el equipo de desarrollo deberá trazar un plan de implementación que integre los objetivos analizados en el modelo que se encuentra en desarrollo. En esta etapa se examinarán los requisitos establecidos, categorizando y dividiendo cada uno dentro del marco del modelo. En el caso de que la implementación sea llevada a cabo por un equipo, este paso será esencial para la división del trabajo, de manera que en la etapa de desarrollo se pueda lograr una solución coherente entre las distintas partes. Este periodo puede variar en función del tamaño del equipo de desarrollo. Sin embargo, en estos casos, un incremento de recursos destinados a esta etapa conduce a una disminución del costo temporal del siguiente. Teniendo todo esto en cuenta, se estima una inversión de entre 2 y 4 horas en cada Sprint para esta tarea.
3. Implementación de los requisitos: el equipo de desarrollo ha definido los objetivos de este Sprint, junto con las especificaciones técnicas que deben implementarse. Ahora, necesitan ejecutar esta implementación, incorporando las estructuras y restricciones necesarias al modelo para integrar la nueva información. Esta fase del Sprint suele ser la más extensa, ya que abarca el tiempo de desarrollo durante el cual se determinan los detalles técnicos del modelo. Además, la metodología Sprint promueve la realización de reuniones diarias a lo largo de este periodo para garantizar el progreso del proyecto y ofrecer flexibilidad ante posibles cambios; estas reuniones estarían incluidas en esta etapa. En total, se estima una inversión de entre 10 y 20 horas en esta fase para cada Sprint.
4. Pruebas de funcionamiento: Una vez finalizada la implementación, el equipo de desarrollo debe definir los casos de prueba para el modelo generado, proporcionando datos de prueba y examinando el modelo en su totalidad para detectar posibles errores e ineficiencias. Esta parte del proceso tiene una alta variabilidad, dado que, dependiendo de la sección del modelo que se esté analizando, llevar a cabo pruebas exhaustivas puede convertirse en un desafío complejo. En la sección 4.3.2, se contempla una aplicación de estos principios para comparar los resultados del modelo final. Es por esta razón que se estima la duración de esta sección entre 2 y 8 horas.

Las conclusiones de este análisis se resumen en la tabla 4.1. Dependiendo del tamaño del equipo y la cantidad de proyectos que la empresa informática lleva a cabo de manera simultánea, cada Sprint puede durar una semana o menos, distribuyendo las horas asignadas entre los miembros del equipo de desarrollo.

<b>Etapa</b>	<b>Tiempo (horas)</b>
Reunión con la administración	3-5
Establecimiento de requisitos técnicos	2-4
Implementación de los requisitos	10-20
Pruebas de funcionamiento	2-8
<b>Total</b>	<b>17-37</b>

**Tabla 4.1:** Estimación de tiempo invertido por etapa en cada Sprint

## Fases de desarrollo

Para la implementación de esta resolución, se propone llevar a cabo tres iteraciones Sprint desde la reunión inicial, en la cual se establecerán los requisitos mínimos de funcionamiento, hasta llegar a las pruebas de la solución final. A continuación, se detalla el enfoque de cada fase del desarrollo, con el propósito de analizar la distribución de costos.

1. Prototipo de requisitos mínimos de funcionamiento: el objetivo de la primera iteración Sprint será obtener un modelo básico que pueda ejecutar una versión simplificada del problema a resolver. La simplificación de este modelo puede surgir de la reducción de los datos proporcionados, la disminución del tamaño del modelo, la limitación de las restricciones a aplicar, o una combinación de estos elementos. En la implementación efectuada en este trabajo, el modelo se basa en un conjunto de datos extremadamente reducido y excluye las restricciones de optimización. La intención de este procedimiento es centrar los esfuerzos en la formulación de un modelo viable aunque ineficiente, permitiendo su mejora en Sprints futuros. Durante este Sprint inicial, el foco estará en las primeras fases, ya que será esencial comunicarse intensivamente con la administración para explicar la naturaleza del problema, y proponer un modelo operativo inicial antes de proceder con la implementación.
2. Prototipo con datos reales: el objetivo de este segundo Sprint es desarrollar un prototipo que pueda procesar datos reales del problema en cuestión. En este caso, dichos datos provendrán de una asignación horaria anterior y requerirán que el modelo adapte su estructura para tener en cuenta las diversas particularidades que la aplicación del problema pueda presentar. La finalidad de este Sprint es desarrollar un prototipo capaz de operar en un entorno real, ampliando las capacidades del prototipo anterior. Durante el Sprint, la etapa intermedia de desarrollo será la que conlleve el mayor gasto de tiempo, ya que el foco estará en realizar una implementación completa del modelo.
3. Herramienta final: Durante esta etapa final, se perfecciona el prototipo proveniente de la etapa anterior. Este perfeccionamiento implica mejorar la eficiencia y preparar el modelo para la escalabilidad, además de crear una aplicación que sea fácil de usar para cualquier usuario. Se desarrollan pruebas exhaustivas para asegurar la exactitud de los resultados del modelo. En este Sprint, los cambios serán menos significativos en comparación con el anterior, pero tendrán igual relevancia para producir una herramienta depurada y sin errores. El foco del coste de este Sprint se sitúa en la sección final, ya que es en esta parte donde el modelo deberá ser probado de manera intensiva antes de su implementación en entornos reales.

## Estimación de costes

Para llevar a cabo una estimación del tiempo de desarrollo, desglosado por Sprint y etapa dentro de cada Sprint, se utiliza la técnica de estimación de tres puntos (o PERT, por sus siglas en inglés). Esta técnica toma en cuenta un escenario optimista  $O$ , un escenario más probable  $M$  y uno pesimista  $P$ , calculando la estimación temporal final  $TE$  a partir de la ecuación  $TE = \frac{O+4M+P}{6}$  (Taylan, Bafail, Abdulaal, y Kabli, 2020). Esta técnica permite tomar como valor principal el escenario más probable, pero también considera que el escenario pesimista y optimista pueden ocurrir con la misma probabilidad. La tabla 4.2 muestra el desglose de las distintas etapas de cada Sprint junto con sus estimaciones temporales.

Etapa	Optimista (O)	Probable (M)	Pesimista (P)
<b>Prototipo de requisitos mínimos de funcionamiento</b>			
Reunión con la administración	3	5	6
Establecimiento de requisitos técnicos	4	4	5
Implementación de los requisitos	12	15	18
Pruebas de funcionamiento	2	3	5
<b>Total Sprint 1</b>	<b>21</b>	<b>27</b>	<b>34</b>
<b>Prototipo con datos reales</b>			
Reunión con la administración	2	3	5
Establecimiento de requisitos técnicos	2	3	4
Implementación de los requisitos	15	18	20
Pruebas de funcionamiento	4	5	8
<b>Total Sprint 2</b>	<b>21</b>	<b>29</b>	<b>37</b>
<b>Herramienta final</b>			
Reunión con la administración	2	2	3
Establecimiento de requisitos técnicos	2	2	3
Implementación de los requisitos	9	12	15
Pruebas de funcionamiento	5	7	9
<b>Total Sprint 3</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>30</b>

**Tabla 4.2:** Estimación de tiempo invertido por etapa en cada Sprint utilizando PERT

Una vez realizado este desglose, se puede obtener el tiempo estimado para cada Sprint utilizando la fórmula de PERT, estas predicciones finales se muestran en la tabla 4.3.

Sprint	Tiempo estimado (horas)
Prototipo de requisitos mínimos de funcionamiento	27.2
Prototipo con datos reales	29
Herramienta final	23.3
<b>Total</b>	<b>79.2</b>

**Tabla 4.3:** Estimación total de tiempo invertido en cada Sprint

Además de los costes temporales de desarrollo, se asume que la reunión con la administración conlleva un tiempo invertido en el desarrollo igual al tiempo de esta etapa restando una hora (debido a las razones establecidas al principio del apartado), la estimación PERT del tiempo invertido por esta será entonces:  $3,8 + 2,2 + 1,2 = 7,2$  horas.

Es importante recalcar que estos cálculos son estimaciones que realizaría la empresa de informática o, en este caso, el estudiante encargado del proyecto, con el objetivo de transformar la metodología y el planteamiento del problema en un presupuesto más específico. Este resulta útil para obtener valores orientativos del valor de la herramienta, así como los plazos de creación y entrega al cliente. En términos de coste de desarrollo, asumiendo un precio medio de 50 euros por hora para el equipo de desarrollo, una cifra representativa en el mercado, el coste total del proyecto sería de aproximadamente 3,960 euros (calculado como  $79,2 \cdot 50 = 3,960$ ). Además, se debe considerar un margen para posibles imprevistos, así como los costes asociados al proyecto más allá del equipo de desarrollo, que suman un total adicional del 25 % del coste del producto final. Con todos estos datos, es posible hacer una predicción del valor del modelo desarrollado, considerando el coste antes de impuestos, que sería de unos 5,000 euros.

## 4.2 Diseño de la solución

### 4.2.1. Soluciones posibles

Como se ha analizado en secciones anteriores, el modelado de problemas de satisfacción de restricciones implica representar el problema real de manera numérica y establecer las restricciones de manera adecuada.

A pesar de la aparente simplicidad de la solución, en la que el número de defensas no supera las 100, cada una de estas involucra hasta 5 docentes desempeñando roles en el tribunal y en la tutoría. Debido a esto, es esencial definir correctamente el problema, ya que la cantidad de cálculos necesarios para su resolución puede rápidamente hacerla inviable.

Para visualizar el problema de manera simplificada, se puede considerar el siguiente modelo simplificado:

Tribunal	Presidencia	Secretaría	Disponibilidad
T1	$trib_{11}$	$trib_{12}$	Lunes de 9:00 a 11:00
T2	$trib_{21}$	$trib_{22}$	Martes de 9:00 a 11:00

Tabla 4.4: Datos de los tribunales

Como se puede observar de las tablas, el primer tribunal con nombre  $T1$  está formado por dos docentes con nombres  $\{trib_{11}, trib_{12}\}$ , y solo tienen disponibilidad el lunes. El segundo tribunal  $T2$  está formado por docentes  $\{trib_{21}, trib_{22}\}$  que tienen disponibilidad el martes.

Defensa	Tutoría
D1	$tut_1$
D2	$trib_{11}$
D3	$tut_2$
D4	$tut_3$

Tabla 4.5: Datos de las defensas

Durante el periodo de defensas se presentan 4 trabajos, identificados como  $\{D1, D2, D3, D4\}$ . La tutoría de cada uno de estos es realizada por un miembro de la docencia diferente al que forma los tribunales, con la excepción del trabajo  $D2$ . En este caso, la tutoría es llevada por  $trib_{11}$ , la misma persona que preside el tribunal  $T1$ . Esto quiere decir que el tribunal  $T1$  no podrá evaluar la defensa del trabajo  $D2$ .

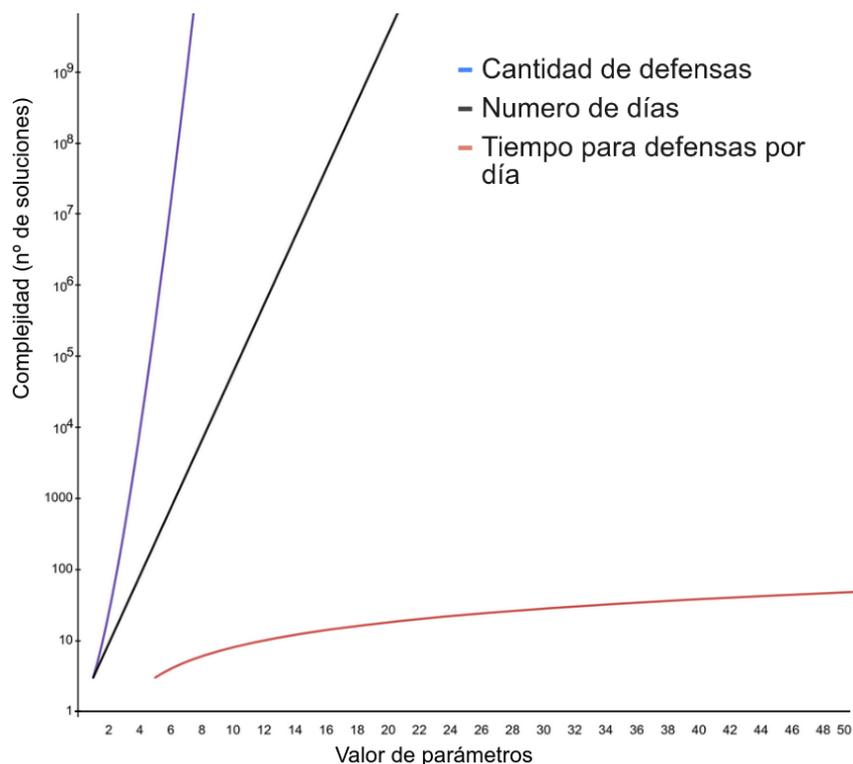
### Complejidad del sistema

Dado que el problema corresponde a un sistema de satisfacción de restricciones, es posible definir y cuantificar el espacio de soluciones que los datos representan. En otras palabras, todas las soluciones posibles del modelo cumplen con las restricciones establecidas. Mediante este valor, es factible determinar la dificultad de resolver un modelo; cuanto mayor sea el espacio de soluciones, se necesitará una exploración más exhaustiva para hallar una solución óptima.

Para este problema, se identifican tres ejes principales de complejidad, es decir, tres variables cuyos cambios influyen en el número de soluciones posibles del problema:

- El número de días disponibles en el periodo de defensas: Cada día adicional en este periodo genera nuevas oportunidades de programación de horarios.
- La cantidad de tiempo disponible para realizar las defensas en un día: Cuanto más tiempo esté disponible para las defensas, mayor será el número de combinaciones posibles.
- La cantidad de defensas programadas en el periodo: Un aumento en la cantidad de defensas conduce a un mayor número de combinaciones posibles.

Habiendo identificado estos tres factores, es posible visualizar sus efectos sobre el número de soluciones, tal como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4:** Evolución del número de soluciones frente al valor de los parámetros del modelo (anexo B.1).

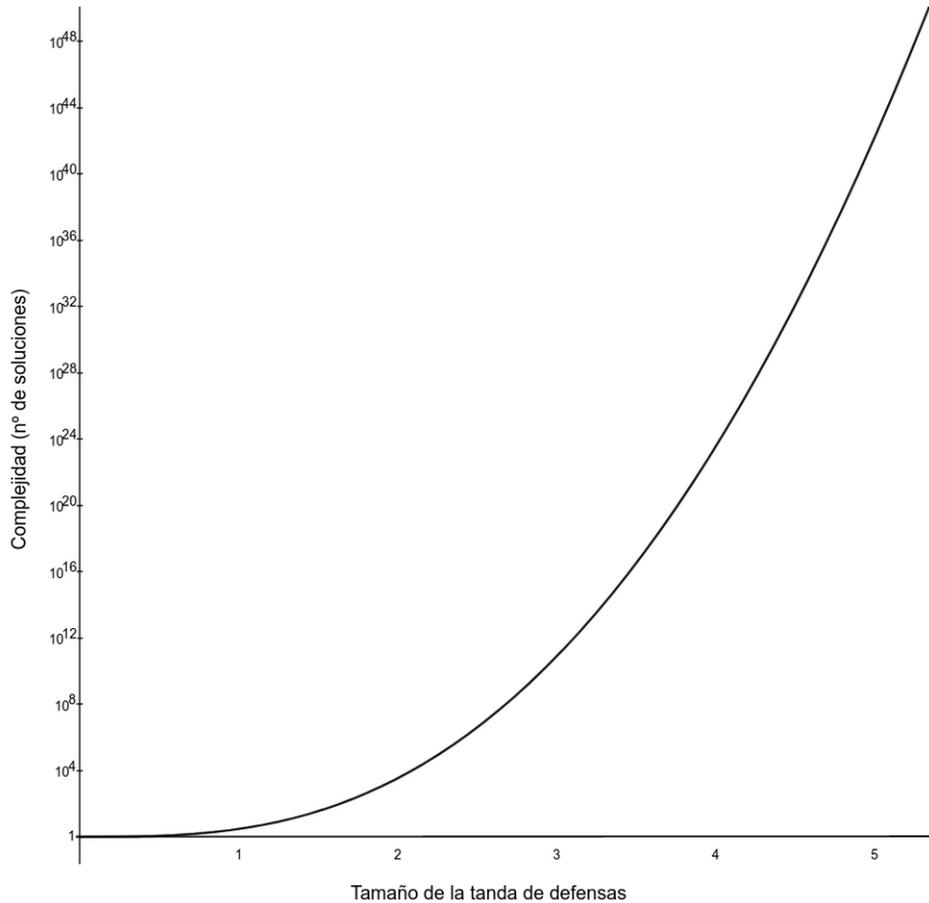
Definir una función que visualice la complejidad total del problema no es un problema trivial, ya que las soluciones anteriores dependen de los valores del resto. Es decir, un aumento de los días disponibles en el periodo de defensas tiene un efecto menor sobre la complejidad si la cantidad de defensas es baja, mientras que su efecto es muy elevado si los otros factores también son elevados.

Para poder visualizar este incremento en tamaño del problema general se busca representar los incrementos específicos de cada variable en función de este tamaño general. Es decir, si el tamaño del un problema planteado para este modelo es grande, sería razonable asumir que habrá una mayor cantidad de defensas programadas para el periodo, así como una mayor cantidad de días disponibles o de espacios en el horario para realizar estas defensas.

Aplicando estos principios a las funciones individuales para cada factor se obtiene una relación entre el tamaño de la tanda de defensas y la complejidad en número de soluciones, mostrado en la figura 4.5. La ecuación que representa esta curva toma la siguiente forma:

$$f_M(x) = x^2! \cdot \left( \frac{(x+2)!}{2!} \right)^x$$

El desarrollo de esta función proviene de las anteriores y se encuentra desglosada en el anexo B.1).



**Figura 4.5:** Evolución del número de soluciones frente al tamaño del problema.

### Sistema completo

En este sistema, se contempla toda la información dentro de un solo modelo de cumplimiento de restricciones, con el objetivo de obtener un resultado directo de dicho modelo. A modo de ejemplo, se conseguiría la distribución horaria indicada en la Figura 4.6.

Para este ejemplo, el modelo ha encontrado la solución más eficiente posible, ya que todos los tribunales tienen sus defensas en el mismo día, y no hay huecos entre defensas.

Como se ha subrayado en secciones anteriores, cuando el volumen de trabajos y docentes aumenta, el modelo debe considerar una gran cantidad de parámetros. En estos casos, resulta imprescindible maximizar la eficiencia del modelo, pues una gestión ineficiente se intensifica con el crecimiento de los datos. Por consiguiente, se hace necesario explorar soluciones alternativas que desglosen el problema en segmentos, posibilitando la creación de modelos más compactos y espacios de solución más limitados.

	Lunes	Martes
9:00	De 9:00 a 9:45 $T1 + D1$	De 9:00 a 9:45 $T2 + D2$
10:00	De 9:45 a 10:30 $T1 + D3$	De 9:45 a 10:30 $T2 + D4$

Figura 4.6: Ejemplo de un resultado final de la ejecución del ejemplo

### División entre defensas y tribunales

La incógnita que más ralentiza al modelo es el horario de los tribunales. Para el ejemplo proporcionado, en el que las opciones se han simplificado al máximo posible sin perder funcionalidad, la cantidad de soluciones potenciales utilizando un modelo que resuelve el sistema en su totalidad es de aproximadamente 250,000 (ver Anexo B.1.2). De todas estas soluciones potenciales, solo 18 son óptimas.

Para minimizar el espacio de soluciones, podemos segmentar el problema en dos partes: primero, la búsqueda de una distribución horaria óptima para los tribunales y, segundo, la asignación de defensas a estos tribunales. Aplicado al ejemplo, un modelo intermedio generaría la distribución horaria que se muestra en la Figura 4.7.

	Lunes	Martes
9:00	De 9:00 a 9:45 $T1$	De 9:00 a 9:45 $T2$
10:00	De 9:45 a 10:30 $T1$	De 9:45 a 10:30 $T2$

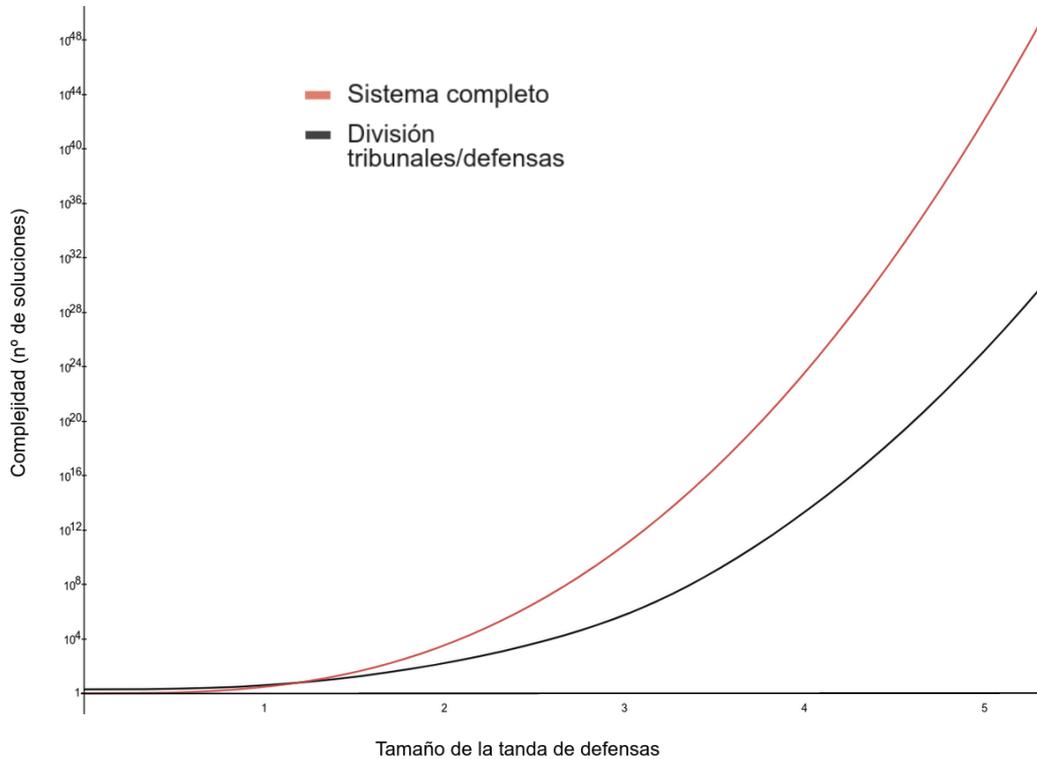
Figura 4.7: Ejemplo de un resultado parcial de los tribunales del ejemplo

Una vez realizada esta planificación, es posible asignar defensas a cada tribunal sin tener en cuenta el horario, enfocándose únicamente en las restricciones relacionadas con las combinaciones de docentes.

En comparación con el método anterior, para el ejemplo dado, el número de soluciones disponibles para el modelo es de unas 15,000, lo que representa una reducción del 95 % en comparación con el primer método (Anexo B.1.3). Sin embargo, este espa-

cio de soluciones continúa expandiéndose exponencialmente, y puede llegar a alcanzar tamaños considerables que ralentizan la búsqueda.

La figura 4.8 permite visualizar estos resultados, comparando con los de la solución completa.



**Figura 4.8:** Comparación de la evolución de complejidad entre el sistema completo y dividido.

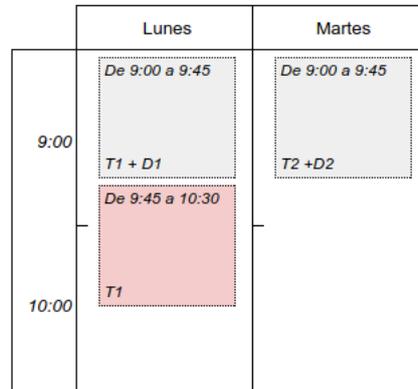
A pesar de las facilidades en la búsqueda de la solución, la separación de la asignación de tribunales y de tareas puede conducir a soluciones ineficientes e incluso declarar que el problema no tiene solución, cuando en realidad sí la podría tener. Debido a que el horario se establece en la distribución de los tribunales, este podría no ser óptimo en relación con la asignación de defensas.

Por ejemplo, si contamos con dos tribunales disponibles para asistir a tres defensas durante un periodo determinado, y ambos tribunales tienen disponibilidad horaria total, una solución óptima a la primera parte del problema podría ser la que se muestra en la Figura 4.9.

	Lunes	Martes
9:00	De 9:00 a 9:45 T1	De 9:00 a 9:45 T2
10:00	De 9:45 a 10:30 T1	

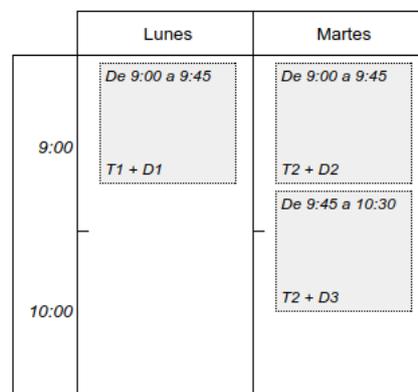
**Figura 4.9:** Ejemplo de un resultado parcial de los tribunales que podría generar un conflicto

Si un miembro del tribunal,  $T1$ , es también vocal en dos de las defensas (por ejemplo,  $D2$  y  $D3$ ), significa que no puede asistir como evaluador a dos de las tres defensas del periodo. En este caso, la segunda parte del problema no encontrará una solución posible a partir de la Figura 4.9, tal como se ilustra en la Figura 4.10.



**Figura 4.10:** Ejemplo de un conflicto posible en la ejecución de un modelo dividido

En este caso, el modelo no sería capaz de cumplir con las restricciones del problema, por lo que no se generaría una solución. Sin embargo, sí que existiría una solución para la formulación del problema, que se muestra en la Figura 4.11.

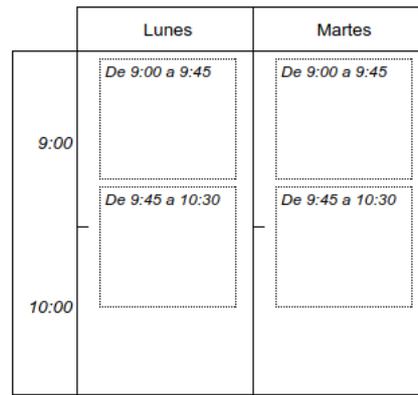


**Figura 4.11:** Resolución correcta del modelo erróneo

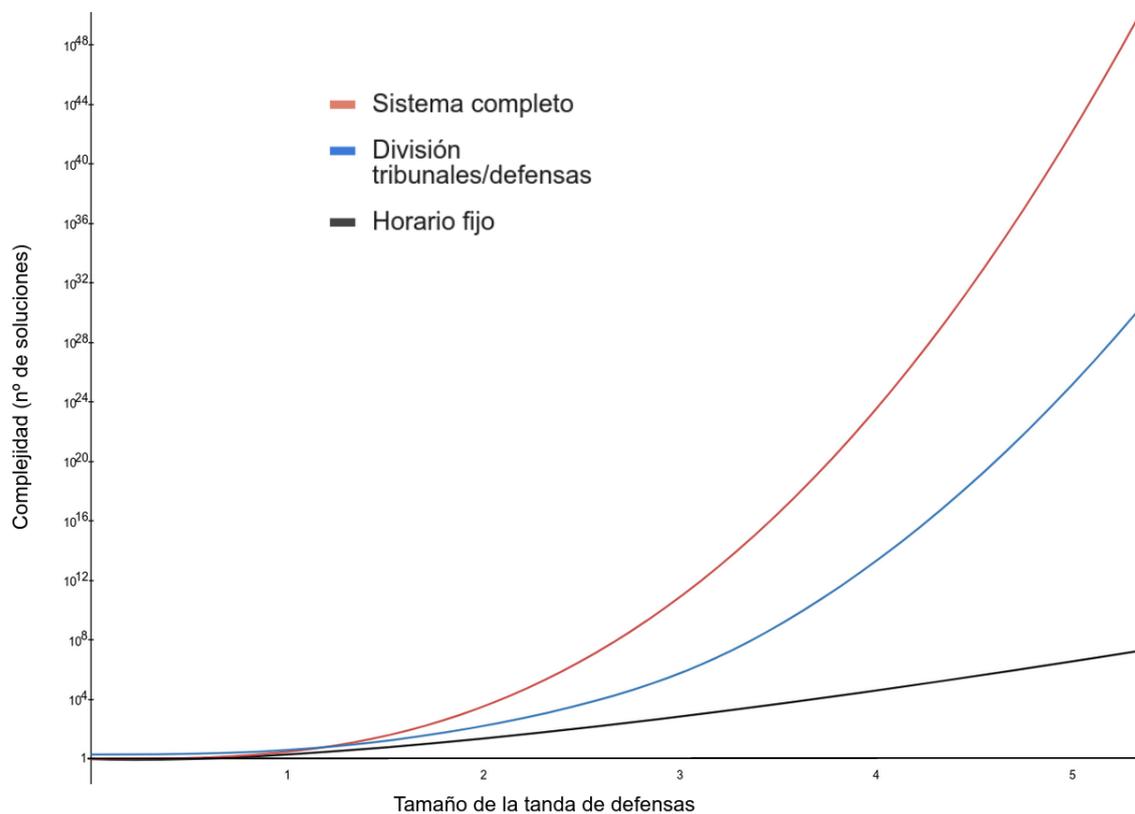
### Horario predeterminado

Para reducir de manera más efectiva el espacio de soluciones, otra alternativa disponible es establecer un horario predefinido. Esto eliminaría la mayoría de las posibilidades, muchas de las cuales surgen de cambios de horario de menor relevancia, como podría ser el retraso de una defensa por 15 minutos.

Para implementar este método, el personal administrativo deberá generar un horario previo al cálculo y determinar la disponibilidad del profesorado en base a este horario preestablecido. Un ejemplo de dicho horario podría ser el mostrado en la Figura 4.12.



**Figura 4.12:** Ejemplo de una plantilla horaria establecida por la administración



**Figura 4.13:** Comparación de la evolución de complejidad entre las 3 soluciones propuestas.

Una vez que el sistema tiene este horario como base, la satisfacción de restricciones y la optimización de las combinaciones se convierten en problemas de resolución sencilla. El espacio de soluciones es tan limitado que la complejidad de resolver cualquier tamaño de problema se vuelve trivial. Para el ejemplo proporcionado, las soluciones posibles que cumplen las restricciones son aproximadamente 500 (Anexo B.1.4). En comparación con el modelo de división entre defensas y tribunales, logramos una reducción del espacio de soluciones de un 97% y del 99,8% frente al modelo de la solución completa. La figura 4.13 resume estas comparaciones.

Las limitaciones de este método provienen de su falta de flexibilidad. El establecimiento de horarios fijos restringe las opciones disponibles para los tribunales para asistir a las defensas. Dichos tribunales ya enfrentan una agenda ajustada, por lo que reducirla aún más podría complicar la resolución del problema. Otra dificultad inherente a este sistema se encuentra en el nivel de comprensión que la administración debe tener de su

funcionamiento. Al necesitar que la administración establezca y comunique un horario fijo al profesorado, se añade una carga de trabajo adicional, así como una necesidad de formación para utilizar el sistema a cualquier persona que desee hacerlo. Estos costes adicionales pueden disminuir la eficacia de la implementación.

### 4.2.2. Solución propuesta

Los modelos de solución propuestos exploran diversas simplificaciones del problema. Como se analizó en secciones anteriores de este trabajo, es esencial considerar el nivel de dicha simplificación y establecer un modelo en colaboración con el departamento que lo utilizará, garantizando que se adapte de la mejor manera posible a las necesidades y limitaciones existentes.

Este equilibrio entre flexibilidad y automatización es una consideración crucial en el proceso de transformar un sistema de asignación de recursos. En otros segmentos, se ha profundizado en este proceso, destacando que la solución más eficiente o más económica a menudo no es la mejor alternativa. Factores como el entorno y la naturaleza de los procesos que se buscan modificar adquieren mayor importancia.

En este caso, la naturaleza del problema, donde los horarios asignados poseen un margen y una vez realizada la asignación no requieren más ajustes, no justifica la necesidad de un único modelo para la solución completa. Debido a la complejidad adicional que esto implicaría, se puede descartar como opción viable.

Por otro lado, la administración de la Facultad de Administración y Dirección de Empresas muestra una inclinación hacia un modelo que permita horarios flexibles. Esto se debe a que los datos de entrada, que provienen de las preferencias del profesorado, suelen traer pequeñas variaciones y preferencias que resultarían difíciles de ajustar en un modelo con horario preestablecido.

Además, la naturaleza del programa sugiere que los posibles cambios que podría experimentar, probablemente provengan de la gestión del horario. Por lo tanto, la solución propuesta es la del segundo sistema.

### 4.2.3. Diseño Detallado

#### Horario de los tribunales

El conjunto de tribunales  $T$  se define de la siguiente manera, donde  $n$  es el número de tribunales que participan en el proceso de defensa. Además, incluye un tribunal añadido  $t_0$ , este representa los espacios vacíos en el horario donde no se asigna ningún tribunal:

$$T = \{t_i \mid 0 \leq i \leq n, i \in \mathbb{N}\}$$

Asimismo, definimos el horario de los días de defensa  $H$  de la siguiente manera, donde  $m$  es la duración total del horario de defensas en períodos de 15 minutos y cada  $h$  representa un intervalo de 15 minutos en el horario:

$$H = \{h \mid 1 \leq h \leq m, h \in \mathbb{N}\}$$

La función  $r_1$  para un  $h$  determinado define el conjunto de tribunales dentro de  $T$  de tal forma que cada tribunal  $t$  está disponible en el intervalo de tiempo definido por  $h$ .

$$r_1 : H \rightarrow T$$

$$\forall h \in H : r_1(h) \in \{t \in T \mid t \text{ está disponible durante } h\}$$

Para distinguir una defensa compuesta por tres secciones de 15 minutos cada una, en las cuales la función  $r_1(h)$  asigna al mismo tribunal  $t$ , definimos una restricción  $r_2$ . Esta restricción genera un valor dependiente de las secciones anteriores y muestra la cantidad de defensas consecutivas que un tribunal ha llevado a cabo:

$$r_2 : H \times T \rightarrow \mathbb{N}$$

En otras palabras, esta restricción registra el número de secciones de 15 minutos consecutivas que ha atendido un tribunal en particular. Si ningún tribunal está asignado a una sección  $h$ , el valor de esta restricción será 0.

$$\forall h \in H, \forall t \in T :$$

$$r_2(h, t) = \begin{cases} 0 & t = t_0 \\ 1 & h = 1 \wedge t \neq t_0 \\ 1 + r_2(h - 1, t') & (t' = t_0 \vee t = t') \wedge h \neq 1 \wedge t \neq t_0 \end{cases}$$

Por ejemplo, establecemos un horario  $H = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ , es decir, un horario que incluye  $m = 8$  intervalos de 15 minutos, lo cual suma un total de 2 horas. Además, definimos un conjunto de tribunales  $T = t_0, t_1, t_2$ , lo que significa que disponemos de  $n = 3$  tribunales para las defensas y se considera un  $t_0$  para los espacios vacíos en el horario. Si el conjunto dado por  $r_1(H)$  es igual a  $t_1, t_1, t_1, t_0, t_0, t_2, t_2, t_2$ , implica que hay una defensa durante los primeros 45 minutos supervisada por el tribunal  $t_1$ , y otra defensa durante los últimos 45 minutos supervisada por el tribunal  $t_2$ , con un descanso de 30 minutos entre ambas defensas. El resultado de aplicar la segunda restricción sobre el horario inicial  $H$  y  $r_1$  sería  $r_2(H, r_1(H)) = 1, 2, 3, 0, 0, 1, 2, 3$ .

Aplicando la segunda restricción, podemos definir un límite máximo de defensas consecutivas a las que un tribunal puede asistir antes de necesitar un descanso. Es decir, para cada  $r_2$  derivado de los resultados de  $r_1$ , no puede haber un valor que supere la cantidad máxima de defensas consecutivas permitidas para un tribunal,  $k$ , multiplicada por 3, que es la duración en intervalos de 15 minutos de cada defensa.

$$\forall h \in H, r_2(h, r_1(h)) < k \cdot 3$$

De manera similar, podemos establecer una duración obligatoria para todas las defensas. Usando los resultados de  $r_2$ , si el valor de  $r_2$  de un intervalo de tiempo disminuye en comparación con el siguiente, indicará el fin de una o más defensas llevadas a cabo por un tribunal y, por tanto, deberá ser múltiplo de 3, ya que esa es la duración de cada defensa en intervalos de 15 minutos.

$$\forall h \in H : h \neq m \wedge r_2(h, r_1(h)) > r_2(h + 1, r_1(h + 1)) \Rightarrow r_2(h, r_1(h)) \pmod{3} = 0$$

Es decir, para cada intervalo  $h$  en el horario  $H$  que no sea el último intervalo, el valor de  $r_2$  en  $h$  debe ser múltiplo de 3 cuando el valor de  $r_2$  en el siguiente intervalo sea menor que el individual. Esta condición asegura que todas las defensas tendrán una duración exacta de 3 intervalos de 15 minutos.

Para garantizar que todas las defensas se programen adecuadamente, se puede establecer un mínimo basándose en los resultados de  $r_1$ . Todos los tribunales designados a un periodo  $h$  tendrán un valor del tribunal, derivado de  $r_1$ , distinto de  $t_0$ . La suma de estos tribunales designados a lo largo de todos los periodos en el horario  $H$  representará el

total de periodos de 15 minutos en los que se llevan a cabo las defensas. Este total deberá ser igual al número de defensas a programar  $d$ , multiplicado por 3, que es la duración en periodos de cada defensa.

$$\sum_{h \in H} \mathbb{I}(r_1(h) \neq t_0) = d \cdot 3$$

Donde  $\mathbb{I}(r_1(h) \neq t_0)$  es 1 si un periodo en el horario tiene asignada una defensa y 0 si no hay ninguna defensa programada.

Para asegurar una distribución equitativa de las defensas entre los tribunales, el modelo establece un mínimo de defensas por tribunal  $g$ . Este mínimo se calcula como el cociente entre el número total de defensas y el número de tribunales. Por ejemplo, si existen 10 defensas y 3 tribunales, cada tribunal deberá supervisar al menos 3 defensas, y el algoritmo determinará el tribunal más apropiado para supervisar la defensa restante.

$$\forall t_i \in T, i > 0 : \sum_{h \in H} \mathbb{I}(r_1(h) = t_i) \geq g \cdot 3$$

Para garantizar esta distribución, se establece la siguiente condición para cada tribunal  $t_{i>0}$ : el número de intervalos  $h$  en el horario  $H$ , donde el resultado de  $r_1$  es igual al valor del tribunal, debe ser mayor o igual al producto del mínimo de defensas  $g$  y 3, que representa la duración en intervalos de cada defensa.

Una vez que se ha completado el modelado de las restricciones del CSP, se puede utilizar este para obtener un resultado que cumpla con la formulación del problema propuesto. Sin embargo, este modelo también incorpora dos parámetros adicionales para optimizar la búsqueda. Estos parámetros corresponden a la optimización del número de días que los tribunales deben asistir a las defensas y la cantidad de tiempo que un tribunal debe esperar innecesariamente entre diferentes defensas en el mismo día.

Para abordar la primera de estas optimizaciones, definimos el conjunto de días en los que se extiende el horario como:

$$D = \{d \mid 1 \leq d \leq y, d \in \mathbb{N}\}$$

Donde  $y$  representa el número de días. La relación  $r_3$  representa el conjunto de periodos en el horario  $H$  que pertenecen a un día  $d$ .

$$r_3 : D \rightarrow 2^H$$

$$\forall d \in D : r_3(d) \subseteq H$$

El modelo define el coste de los días,  $C_d$ , como la suma de los distintos tribunales presentes cada día. Al minimizar este coste, se reducirá la cantidad de tribunales distintos por día. El resultado óptimo sería aquel en el que sólo un tribunal asiste cada día, es decir, donde el coste de los días es igual al número de tribunales  $C_d = n$ .

$$C_d = \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \mathbb{I}(\exists h \in r_3(d) : r_1(h) = t)$$

Esta expresión señala que para cada día  $d$  y cada tribunal  $t$ , si existe algún intervalo en el que se realiza una defensa  $r_3(d)$  en el que el tribunal convocado  $r_1(h)$  es  $t$ , entonces se añadirá 1 a la cuenta total de  $C_d$ .

Para calcular el tiempo de espera innecesario en los tribunales a lo largo de la semana, se utiliza un método similar al de los días. Para cada día  $d$  y cada tribunal  $t$ , se realiza el siguiente cálculo: primero, sumar todos los periodos horarios  $h$  que pertenecen a  $r_3(d)$

donde  $r_1(h) \neq t$  y  $r_1(h+1) = t$ . Luego, restar todos los periodos horarios  $h$  que pertenecen a  $r_3(d)$  donde  $r_1(h) = t$  y  $r_1(h+1) \neq t$ . Con este proceso, se obtiene el número total de periodos en los que el tribunal  $t$  no tiene defensas asignadas para un día. No obstante, este valor incluye el tiempo al principio y al final del día, que no afecta la espera del personal docente, ya que llegará a la hora de la primera defensa y se irá al finalizar la última. Para eliminar estos dos espacios de tiempo del valor de  $C_h$ , restamos el mínimo de los  $h$  pertenecientes a  $r_3(d)$  donde  $r_1(h) = t$  y sumamos el máximo de ellos.

$$\begin{aligned} S_{d,t} &= \{h \in r_3(d) \mid r_1(h) \neq t \wedge r_1(h+1) = t\} \\ R_{d,t} &= \{h \in r_3(d) \mid r_1(h) = t \wedge r_1(h+1) \neq t\} \\ H_{min,d,t} &= \text{mín}\{h \in r_3(d) \mid r_1(h) = t\} \\ H_{max,d,t} &= \text{máx}\{h \in r_3(d) \mid r_1(h) = t\} \\ C_h &= \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \left( \sum_{h \in S_{d,t}} h - \sum_{h \in R_{d,t}} h - H_{min,d,t} + H_{max,d,t} \right) \end{aligned}$$

Finalmente, la función objetivo a minimizar será la suma de estos dos costes, ponderados por ciertos factores que reflejen la importancia de cada uno. Es razonable que el coste de una espera de 15 minutos sea menor que el de asistir a un día adicional de defensa, aunque el valor específico de este coste deberá ser determinado por la administración de la facultad. Matemáticamente, la función objetivo puede expresarse como:

$$\text{Minimizar } \alpha \cdot C_d + \beta \cdot C_h$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los pesos asignados al coste de los días adicionales y al número de horas de espera innecesarias, respectivamente.

### Asignación de las defensas

La asignación de defensas es un modelo mucho más sencillo que el de tribunales, dado que no requiere la distribución de un horario. El objetivo principal de este modelo es evitar conflictos entre docentes que participan en una defensa y minimizar el número de días que el profesorado debe asistir a defensas.

Se define  $P$  como el conjunto de docentes  $p_i$ . Estos docentes son los que participan en las defensas, siendo miembros tanto de los tribunales como de los equipos docentes implicados en un trabajo. En este caso,  $n$  representa el número total de docentes que participan en el proceso de defensas durante la convocatoria.

$$P = \{p_i \mid 1 \leq i \leq n, i \in \mathbb{N}\}$$

El horario para los días de defensa, denotado como  $H$ , se define de forma distinta en este modelo en comparación con el anterior. Aquí, cada intervalo de tiempo en el horario  $h$  representa una tutoría completa, por lo que solo es necesario modelar las tutorías ya establecidas. En este caso,  $m$  representa la cantidad total de defensas que se llevarán a cabo durante el periodo.

$$H = \{h \mid 1 \leq h \leq m, h \in \mathbb{N}\}$$

El modelo define la relación de una defensa específica en el horario  $h$  con su tribunal  $r_1(h)$ , formado dos docentes que deben ser diferentes.

$$r_1 : H \rightarrow \{X \subseteq P \mid |X| = 2\}$$

$$\forall h \in H, \exists p_{pres}, p_{sec} \in P : r_1(h) = \{p_{pres}, p_{sec}\}$$

Esta función indica que para cada defensa  $h$ ,  $r_1(h)$  representa los dos docentes  $\{p_{pres}, p_{sec}\}$  que forman la presidencia y secretaría del tribunal, siendo ambas personas distintas entre sí.

De manera similar a la función  $r_1$ , que representa a los docentes que componen el tribunal asignado a un periodo horario específico, se define la función  $r_2$ . Esta última indica los docentes involucrados en el proyecto que se defenderá durante el mencionado periodo. El profesorado asignado se distribuye en cuatro roles distintos: tutor  $p_{tut}$ , cotutor  $p_{cot}$ , vocal  $p_{voc}$  y covocal  $p_{cov}$ , todos estos deben ser diferentes entre sí. Cabe destacar que el rol de cotutor posee una característica única, ya que puede o no estar presente. En otras palabras, puede adquirir el valor de  $p_0$ , lo que significa que no se ha asignado un docente a este puesto.

$$\begin{aligned} r_2 : H &\rightarrow \{X \subseteq P \mid |X| = 4\} \\ \forall h \in H, \exists p_{tut}, p_{voc}, p_{cov} \in P, \exists p_{cot} \in P \cup p_0 : \\ r_2(h) &= \{p_{tut}, p_{voc}, p_{cov}, p_{cot}\} \end{aligned}$$

Además, los docentes asignados a las dos funciones definidas,  $r_1$ , como miembros del tribunal, y  $r_2$ , en roles de tutoría y vocales, para una defensa específica  $h$  programada, no deben coincidir. Esto implica que la intersección del conjunto de docentes en  $r_1(h)$  y  $r_2(h)$  para cualquier  $h$  en  $H$  debe ser el conjunto vacío.

$$\forall h \in H : r_1(h) \cap r_2(h) = \emptyset$$

Con estos supuestos, el modelo se puede formular como un problema de satisfacción de restricciones y así hallar soluciones que cumplan con estas restricciones. De manera similar al modelo anterior, se propone una optimización en los días que cada docente necesita asistir al centro para las defensas, incluyendo tanto a los miembros del tribunal como a los docentes asignados a trabajos específicos.

Para poder abordar la optimización, se define el conjunto de días durante los cuales se prolonga el horario como:

$$D = \{d \mid 1 \leq d \leq y, d \in \mathbb{N}\}$$

Donde  $y$  representa el número de días. La relación  $r_3$  representa el conjunto de periodos en el horario  $H$  que corresponden a un día  $d$ .

$$\begin{aligned} r_3 : D &\rightarrow 2^H \\ \forall d \in D : r_3(d) &\subseteq H \end{aligned}$$

El modelo establece el coste a optimizar,  $C$ , como la suma del número de docentes diferentes presentes cada día. Es decir, si un miembro del profesorado tiene que asistir a defensas en más de un día, esto representará un coste adicional para el modelo.

$$C = \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \mathbb{I}(\exists h \in r_3(d) : r_1(h) = p \vee r_2(h) = p)$$

Esta expresión señala que, para cada día  $d$  y docente  $p$ , si hay alguna defensa  $r_3(d)$  en la que participa (ya sea como miembro del tribunal  $r_1$  o como parte del trabajo  $r_2$ ), se sumará 1 a la cuenta total de  $C$ .

De este modo, la función objetivo a minimizar es el coste  $C$ , que simboliza el tiempo improductivo del profesorado y, por consiguiente, los recursos desperdiciados en el sistema. La implementación de este modelo basado en los resultados del modelo anterior proporcionará la solución final al problema de restricciones.

#### 4.2.4. Ejemplo de resolución del modelo

El modelo descrito puede ser complejo de entender desde una perspectiva matemática pura. Para visualizar el desarrollo del modelo se plantea en este apartado un ejemplo simple aplicado que repasa cada una de las restricciones. En el desarrollo del modelo se comenzará con un ejemplo de datos que satisface las restricciones, para evitar confusión en las explicaciones, y se aplicarán las restricciones de manera secuencial. Es importante destacar que el Solver que implementa el modelo no aplica las restricciones de la misma manera, y explora las soluciones posibles intercambiando las distintas restricciones en el proceso de la búsqueda.

##### Horario de los tribunales

Para el ejemplo se plantea una semana de defensas que contiene 2 tribunales,  $n = 2$ , es decir,  $T = \{t_0, t_1, t_2\}$ , donde  $t_0$  representa los espacios vacíos en el horario. Además, se programan 2 defensas,  $d = 2$ , en un horario de defensas de 1.5 horas, es decir,  $m = 6$  intervalos de 15 minutos y  $H = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Para simplificar, se establece que todos los tribunales están disponibles en todos los intervalos de tiempo. Por tanto, la función  $r_1$  puede asignar cualquier tribunal a cualquier intervalo de tiempo.

Asimismo, se establece también que cada tribunal supervisará un máximo de 1 defensa consecutiva,  $k = 1$ , y que todas las defensas deben ser de exactamente 3 intervalos de tiempo de 15 minutos.

A partir de estos datos se llena el horario de la siguiente manera: tomando los resultados de la función  $r_1$ , se asigna el tribunal  $t_1$  a los primeros 3 intervalos de tiempo y el tribunal  $t_2$  a los últimos 3 intervalos. De esta forma, se cumple con la restricción de que cada tribunal no supervise más de una defensa consecutiva, así como con la asignación de tres intervalos de tiempo por tribunal. Sin embargo, esto podría no ser el caso, ya que aún no se han verificado las restricciones que controlan estos factores.

La función  $r_1(H)$  sería entonces  $\{t_1, t_1, t_1, t_2, t_2, t_2\}$ , lo que significa que el tribunal  $t_1$  supervisa una defensa en los primeros 45 minutos y el tribunal  $t_2$  supervisa otra defensa en los últimos 45 minutos.

El resultado de aplicar la segunda restricción sobre el horario inicial  $H$  y  $r_1$  sería  $r_2(H, r_1(H)) = \{1, 2, 3, 1, 2, 3\}$ . Aquí se puede ver que cada tribunal supervisa exactamente 1 defensa, de 3 intervalos de tiempo de 15 minutos, y no hay ningún valor en  $r_2$  que sobrepase el límite de  $k \cdot 3 = 3$ .

Esto satisface la restricción de que todas las defensas deben tener una duración exacta de 3 intervalos de tiempo, ya que para cada intervalo  $h$  en el horario  $H$ , el valor de  $r_2(h, r_1(h))$  es múltiplo de 3 cuando el valor de  $r_2$  en el siguiente intervalo es menor que el actual o el elemento es el último, esto ocurre en los elementos marcados:  $\{1, 2, 3, 1, 2, 3\}$ .

Además, si sumamos los intervalos en los que cada tribunal supervisa una defensa, obtenemos un total de 6 intervalos de 15 minutos, que es igual al número de defensas a programar,  $d$ , multiplicado por 3, que es la duración en periodos de cada defensa. Así,  $\sum_{h \in H} \mathbb{I}(r_1(h) \neq t_0) = 2 \cdot 3 = 6$ .

Finalmente, cada tribunal supervisa 1 defensa, lo cual satisface la restricción de que cada tribunal debe supervisar al menos  $g = \lfloor \frac{d}{n} \rfloor = 1$  defensa.

Una vez reducido el espacio de soluciones a aquellas que cumplen con el problema de satisfacción de restricciones, se llevaría a cabo la búsqueda de la solución óptima. Debido a la simpleza de este ejemplo no se explora esta optimización, pero el proceso de definición de  $C_d$  y  $C_h$  sería el mismo al de las restricciones que se han visto anteriormente.

### Asignación de las defensas

Continuando con el ejemplo anterior donde teníamos dos defensas ( $m = 2$ ), dos tribunales ( $n = 2$ ), y el horario está dividido en dos defensas ( $H = 1, 2$ ). Se establece una participación de cuatro docentes ( $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ ).

En la combinación elegida por el modelo para la primera defensa, el tribunal está formado por  $p_1$  y  $p_2$ , y los roles de tutoría y vocales se reparten entre  $p_3$  y  $p_4$ . Entonces, las funciones  $r_1$  y  $r_2$  darían para la primera defensa programada en el horario  $r_1(1) = p_1, p_2$  y  $r_2(1) = p_3, p_4$ .

Para la segunda defensa, la combinación elegida establece que el tribunal está formado por  $p_3$  y  $p_4$ , y los roles de tutoría y vocales son desempeñados por  $p_1$  y  $p_2$ . En este caso,  $r_1(2) = p_3, p_4$  y  $r_2(2) = p_1, p_2$ .

En este caso, los docentes asignados a las dos funciones definidas,  $r_1$  y  $r_2$ , para cada defensa específica, no coinciden. Es decir, la intersección del conjunto de docentes en  $r_1(h)$  y  $r_2(h)$  para cada  $h$  en  $H$  es el conjunto vacío, cumpliendo con la restricción  $\forall h \in H : r_1(h) \cap r_2(h) = \emptyset$ .

Dado que todas las defensas ocurren en un solo día, tenemos que  $r_3(1) = 1, 2$ , ya que ambos intervalos de defensa corresponden a ese día.

Finalmente, el coste total de este horario sería la suma del número de docentes diferentes presentes cada día. En este caso, cada docente asiste a defensas durante el único día disponible, por lo que el coste sería  $C = 4$ . Este será el coste óptimo ya que solo hay 4 docentes en el ejemplo y 1 día de defensas, por lo que los 4 docentes deberán asistir únicamente un día.

Así, el modelo de asignación de defensas, en este ejemplo, cumple con todas las restricciones y también minimiza el coste total.

#### 4.2.5. Tecnologías utilizadas

Este trabajo no profundiza en la implementación del modelo propuesto más allá de su definición matemática, dado su contexto dentro de la Facultad de Administración y Dirección de Empresas. El enfoque principal es demostrar la importancia de la asignación de recursos en un contexto empresarial y proporcionar un caso detallado en el que se emplea un modelo para mejorar un sistema de gestión de recursos. Por tanto, no se ofrecerá una descripción detallada de la implementación específica del diseño.

A pesar de lo anterior, es importante señalar que hay muchos modelos para resolver problemas de satisfacción en las empresas. Los dos modelos independientes propuestos en el diseño utilizan diferentes herramientas de resolución, conocidas como "solvers", en su implementación. Estas se benefician de diferentes características en el algoritmo de búsqueda de soluciones (ver Anexo, sección "Prácticas", referencia B.2).

## 4.3 Implantación

---

### 4.3.1. Instalación del sistema

El modelo está implementado en la herramienta "Google Colaboratory". Este software está integrado en el servicio de Google Drive, por lo tanto, es accesible desde un navegador en cualquier sistema sin la necesidad de ejecutar un programa o realizar una instalación.

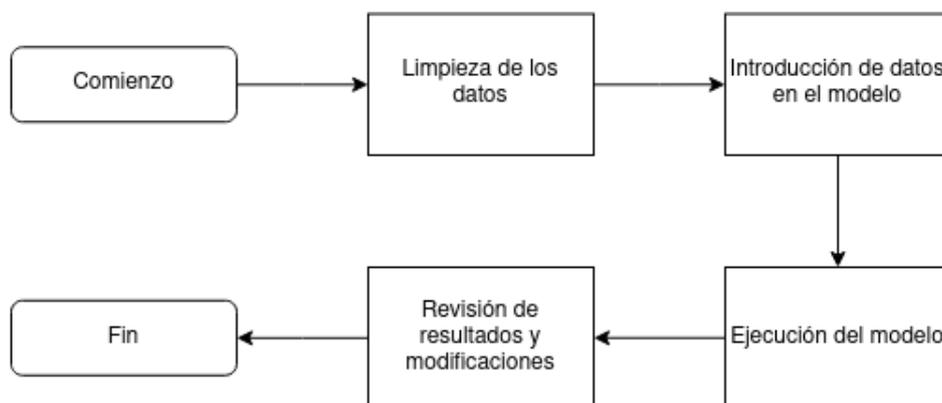
La información proporcionada al modelo, desde los horarios de los tribunales hasta la lista de trabajos a defender, se genera a través de una hoja de Excel o Google Sheets, ambas accesibles desde un navegador.

El enfoque del sistema desarrollado se encuentra en su simplicidad de uso y facilidad de implementación. Desde cualquier sistema, se puede realizar una ejecución de manera rápida con procesos que no requieren el uso de herramientas especializadas.

Un aspecto importante de la implantación es la estandarización de los nombres en los datos proporcionados al modelo. Los acentos, mayúsculas y nombres compuestos afectar a la consistencia de los datos si no se manejan de manera correcta. Por ejemplo, el algoritmo trata a nombres con pequeñas variaciones como dos entidades diferentes aunque se refieran a la misma persona. Por ejemplo, el sistema tratará a "Maria Luisa" y "M<sup>a</sup> Luisa" como dos docentes diferentes debido a la diferencia en el nombre. De manera similar, "Juan Pablo" y "Juan-Pablo" también serán considerados como personas distintas.

Esta estandarización es esencial para mantener la calidad de los datos, facilitando la tarea de procesamiento de los mismos por parte del modelo. La administración deberá asegurarse de que todos los nombres se estandaricen de acuerdo con una convención definida antes de su entrada al modelo, como parte de la tarea de limpieza de datos.

La imagen 4.14 muestra el flujo de trabajo correspondiente a la tarea de asignación de defensas a tribunales y horarios de la administración, con las modificaciones añadidas para la incorporación del modelo.



**Figura 4.14:** Diagrama de flujo representando el proceso de gestión del periodo de defensas por la administración

### 4.3.2. Comparación y mejoras

#### Comparación con proceso anterior

Para llevar a cabo una evaluación adecuada de la implementación del modelo, es necesario contrastar los resultados con aquellos que se obtendrían mediante la administración manual por parte de la facultad. Se pueden establecer dos áreas para la evaluación comparativa:

- Ahorro de tiempo: La automatización en la búsqueda de soluciones conlleva un ahorro de tiempo significativo, tiempo que la administración tendría que invertir en la gestión de la distribución horaria. Dada la naturaleza del problema, que requiere la creación de un horario en un periodo de tiempo muy limitado, esta reducción es especialmente beneficiosa. Alivia el estrés y nivela los picos de trabajo.

- **Distribución mejorada:** El modelo automatizado lleva a cabo una búsqueda exhaustiva en el espacio de soluciones, encontrando así la solución de menor coste para el problema. Dado que los horarios de múltiples docentes dependen de esta distribución, los ahorros pueden ser significativos. Para cada docente que necesite asistir un día menos durante el periodo de defensas, se genera un ahorro importante, mejorando de este modo el bienestar del personal docente.

Es importante considerar el factor del tamaño de la tanda de defensas en esta áreas de mejora, ya que el modelo produce los mismos resultados independientemente del número de defensas. Sin embargo, la probabilidad de cometer errores aumenta cuando el número de defensas se incrementa, ya que el personal administrativo debe tener en cuenta un mayor número de factores en su distribución.

El período de defensas de marzo de 2023 duró tres días, durante los cuales se presentaron 19 trabajos, con la participación de 44 docentes, ya sea formando parte de los tribunales o estando vinculados a los trabajos presentados. La distribución realizada por la administración duró aproximadamente 2 horas, un coste que la aplicación del modelo habría eliminado, ya que su ejecución para esta instancia del problema dura solo unos 10 segundos.

La eficiencia del horario generado por la administración para los tribunales, mencionado en la primera parte de la resolución, es igual a la obtenida por el modelo, es decir, es óptima. Sin embargo, en la segunda parte de la resolución, el modelo identifica una solución óptima que presenta una diferencia de coste de cinco días en comparación con la propuesta por la administración. En resumen, en el resultado final, el modelo consigue un ahorro al evitar que cinco miembros del profesorado deban acudir un día extra durante el periodo de defensas.

Una análisis más meticuloso de la diferencia entre los resultados es importante para efectuar comparativas más desarrolladas. No obstante, este tipo de comparación requiere de un proceso exhaustivo de análisis. Existen millones de soluciones óptimas para la distribución de marzo en cada una de las dos partes del modelo. En ambos casos, se debe llevar a cabo un proceso matemático para encontrar aquella solución que tenga la mayor intersección con la solución humana, pero que aún alcance el óptimo de una mejora de 5 miembros del profesorado. La búsqueda de esta "solución óptima más similar a la humana" demanda, por sí misma, otro modelo de optimización de restricciones adicional y no trivial.

La distribución horaria óptima, sin tomar en cuenta la asignación de tareas ni de tribunales, idéntica para ambos modelos, se muestra en la figura 4.15.

	Miercoles 29 Marzo	Jueves 30 Marzo	Viernes 31 Marzo
<b>09</b>	09:30 - 10:15	09:30 - 10:15	09:30 - 10:15
<b>10</b>	10:15 - 11:00	10:15 - 11:00	10:15 - 11:00
<b>11</b>	11:00 - 11:45	11:15 - 12:00	11:00 - 11:45
<b>12</b>	12:00 - 12:45	12:00 - 12:45	12:00 - 12:45
	12:45 - 13:30	12:45 - 13:30	12:45 - 13:30
<b>13</b>		13:30 - 14:15	
<b>14</b>			
<b>15</b>		15:00 - 15:45	
		15:45 - 16:30	
<b>16</b>		16:30 - 17:15	
<b>17</b>			

**Figura 4.15:** Horario de la distribución inicial

Para la asignación de defensas a este horario, se realiza el mismo análisis de la solución óptima más similar entre la solución de la administración y la generada por el modelo. La figura 4.16 muestra en verde las defensas asignadas de manera idéntica tanto por la distribución humana como por el modelo, y en rojo aquellas que varían.

	Miércoles 29 Marzo	Jueves 30 Marzo	Viernes 31 Marzo
09	09:30 - 10:15	09:30 - 10:15	09:30 - 10:15
10	10:15 - 11:00	10:15 - 11:00	10:15 - 11:00
11	11:00 - 11:45	11:15 - 12:00	11:00 - 11:45
12	12:00 - 12:45	12:00 - 12:45	12:00 - 12:45
13	12:45 - 13:30	12:45 - 13:30	12:45 - 13:30
14		13:30 - 14:15	
15		15:00 - 15:45	
16		15:45 - 16:30	
17		16:30 - 17:15	

**Figura 4.16:** Diferencias entre la asignación humana y el modelo

En la tabla 4.6 se muestra, día a día, el ahorro diferencial proporcionado por la distribución. Para llevar a cabo este análisis, se toma en cuenta la situación en la que un miembro de la docencia asiste a más de una defensa el mismo día, dado que esto implica un ahorro en términos de no tener que asistir a esa defensa en un día diferente. La suma de estos ahorros diarios resulta en un ahorro total de 5 para el modelo que coincide con los resultados que indicaba el coste inicial del modelo.

Día	Administración	Modelo
1	2	0
2	6	11
3	3	5
Total	11	16

**Tabla 4.6:** Diferencias de distribución para el caso de marzo.

Se puede observar que la distribución implementada por la administración reparte las defensas repetidas entre los miembros de la docencia de una manera más equitativa a lo largo de los días. Sin embargo, esta práctica da lugar a ineficiencias en comparación con la solución propuesta por el modelo.

### Mejoras posibles

La naturaleza del modelo como un Problema de Satisfacción de Restricciones (CSP) limita la flexibilidad de las soluciones. En el caso mencionado de las defensas de marzo,

inicialmente, el modelo encontraba que el problema no presentaba solución. Este no era un error de formulación, sino que se debía a que uno de los tribunales había establecido un horario muy limitado, por lo que era necesario realizar más defensas consecutivas del máximo permitido anterior. En este escenario, un modelo concebido puramente como un problema de optimización de restricciones, habría encontrado esta solución sin necesidad de incrementar el parámetro de defensas consecutivas permitidas, relajando la restricción automáticamente e introduciendo un coste asociado por hacerlo. Un modelo más sofisticado tendría en cuenta estas posibilidades, y establecería una serie de costes para jerarquizar las diversas restricciones según su importancia, siendo capaz de eliminar la restricción menos prioritaria si su cumplimiento resultara imposible.

Una mejora natural del modelo sería habilitar defensas simultáneas a lo largo del periodo. Esta medida podría implementarse para reducir la duración del periodo de defensas, lo que facilitaría su administración y permitiría que un mayor número de estudiantes defendiera su trabajo. No obstante, la formulación actual del modelo no proporciona las condiciones necesarias para implementar este cambio de manera sencilla, y requeriría modificaciones significativas para su funcionamiento. Desde un enfoque empresarial, es crucial tener en cuenta las posibles mejoras al producto final, ya que éstas podrían representar un coste adicional de mantenimiento considerable.

---

---

## CAPÍTULO 5

# Conclusiones

---

### 5.1 Planteamiento teórico

---

En el planteamiento teórico se han analizado los recursos como un componente esencial de cualquier empresa dónde su gestión adecuada es esencial para el éxito. Los enfoques para gestionar estos recursos pueden ser matemáticos, procesuales o metodológicos, y cada uno tiene sus propios beneficios y aplicaciones. Una buena gestión de recursos puede dar lugar a una ventaja competitiva, como se ha mostrado en los casos de Toyota y Amazon. En estas compañías los principios de excelencia operativa y el desarrollo tecnológico han llevado a un incremento de eficiencia y valor.

Los distintos sistemas de gestión de recursos, cuando están integrados en un ecosistema conectado, mejoran la comunicación entre procesos y aumentan la eficiencia. Sin embargo, hay que tener en cuenta los riesgos asociados con la asignación de recursos, especialmente en lo que respecta al análisis automático y la supervisión de los resultados.

La implementación de nuevas tecnologías de gestión de recursos también lleva consigo costes, pero si se manejan con cuidado, puede ser una inversión de valor para la empresa. La preparación del cambio, personalización del software, implementación, entrenamiento y mantenimiento son pasos clave en este proceso.

Los avances tecnológicos, como los sistemas de optimización, automatización, análisis y comunicación, han revolucionado la gestión de recursos en las empresas, proporcionando herramientas más eficientes y precisas para reducir ineficiencias, eliminar tareas repetitivas, analizar grandes volúmenes de datos y compartir recursos de manera más efectiva. En general, la adopción de estas tecnologías puede proporcionar a las empresas un mayor grado de agilidad, eficiencia y flexibilidad, lo que a su vez puede dar lugar a una ventaja competitiva significativa.

### 5.2 Desarrollo del trabajo

---

En el desarrollo del caso práctico, se han explorado y desarrollado tres modelos con distintos enfoques para optimizar la asignación de defensas en la empresa. En el primer modelo, se representa el problema en su totalidad para asegurar la obtención de una solución óptima. Sin embargo, el tiempo de ejecución puede ser elevado en problemas con más datos debido al gran número de posibles soluciones. El segundo modelo divide la asignación de defensas y la creación de los huecos horarios, lo que reduce la cantidad de soluciones a cambio de una posible pérdida de eficiencia en algunas situaciones. El tercer modelo es el más simplificado, en el que la administración fija el horario de las defensas y el modelo simplemente distribuye los tribunales y trabajos en este horario

establecido. Aunque se reduce considerablemente la complejidad del problema, también se limita la flexibilidad y se añaden tareas a la administración, reduciendo la efectividad de la solución.

El modelo ha logrado representar la situación real compleja a través de una serie de variables y restricciones representadas como funciones matemáticas. El segundo modelo, que dividía la asignación de defensas y la creación del horario, se ha identificado como el más equilibrado para representar la solución en términos de complejidad y flexibilidad. El horario se divide en intervalos de 15 minutos para poder asignar distintos tribunales a las secciones, y luego se asignan los trabajos en un modelo separado.

Se estima que este enfoque permitirá un ahorro de costes de más de 15 horas al año para la administración. Sin embargo, el ahorro significativo viene de una mejor distribución del profesorado que minimiza la cantidad de días que deben asistir a tutorías, disminuyendo los costes asociados. Además, el modelo busca la solución óptima y, por lo tanto, elimina el margen de error, siempre que se realice una correcta limpieza y formato de los datos previamente a la ejecución.

Los resultados obtenidos a lo largo del estudio están en línea con el objetivo principal planteado en el primer capítulo: demostrar la importancia y el potencial de los sistemas de gestión de recursos en las empresas, y cómo la tecnología puede ser una herramienta valiosa en este contexto. En este sentido, el modelo desarrollado muestra exitosamente esta aplicación y se relaciona con los conceptos teóricos introducidos a lo largo del trabajo.

Finalmente, es importante destacar la aplicabilidad del modelo más allá de la asignación de tribunales y trabajos para las defensas. Los problemas de distribución horaria están presentes en muchos aspectos de los negocios y con pocas modificaciones, este modelo podría adaptarse para incluir otros procesos en la empresa. El modelo ofrece una mejora en la eficiencia, reducción de costes y minimización de errores, no solo para la asignación de defensas, sino también para otros problemas similares. Por tanto, puede ser una herramienta valiosa para ayudar a una empresa a abordar estos desafíos.

### **5.2.1. Aprendizaje personal**

Los fundamentos teóricos y prácticos de este trabajo se encuentran dentro del plan de estudios de la carrera de Administración y Dirección de Empresas. Sin embargo, el modelo propuesto supera significativamente la complejidad de los modelos estudiados durante los cursos de dicha carrera. Lejos de desanimar su desarrollo, esta condición ha sido vista como un desafío para explorar sistemas distintos con un nivel de detalle mayor, y llevar a cabo una implementación que se ajuste al problema propuesto.

Más allá de la implementación del modelo, el aprendizaje de los sistemas que se han definido ha requerido una inversión aproximada de 100 horas. En consonancia con lo que plantea la parte teórica del estudio, se considera que estas herramientas serán de gran valor en una futura carrera profesional, y que la inversión en su aprendizaje ha sido acertada.

### **5.2.2. Errores y dificultades**

La sección más complicada en la elaboración de este trabajo ha sido el desarrollo del modelo y la representación de las distintas condiciones reales en variables matemáticas. Para enfrentar a esta dificultad, la metodología ágil utilizada ha proporcionado herramientas de mucho valor. La creación de prototipos intermedios a través de pequeñas iteraciones ha permitido solventar los problemas que han surgido en su resolución y corregir errores antes de que sus efectos pasasen desapercibidos.

La implementación del modelo ha necesitado de múltiples iteraciones para alcanzar un resultado realista y viable. Inicialmente se desarrolló el sistema integral del modelo, tal como se describe en el apartado 4.2.1. Sin embargo, al constatar la necesidad de una reducción en el espacio de soluciones, se propusieron otros modelos alternativos. En retrospectiva, habría sido más eficiente llevar a cabo el desarrollo del cálculo de la complejidad del modelo (ver anexo B.1) antes de esta etapa, ya que esto podría haber orientado la solución hacia el segundo modelo, permitiendo la reducción del número de soluciones sin afectar significativamente la capacidad de resolución.

Otro error identificado en el trabajo está asociado con los datos de entrada. En las primeras iteraciones de la solución, se utilizaban datos generados artificialmente para comprobar los resultados, representando así la información recibida para la gestión de defensas. Como resultado, el diseño de este modelo se adaptaba a los datos proporcionados, pero mostraba fallos cuando se probaba con datos reales, lo que exigía revisiones posteriores. Para este proyecto, había datos históricos disponibles que podrían haberse utilizado desde el comienzo en el diseño del modelo. No obstante, incluso si el modelo en desarrollo no dispone de datos históricos, se debe tener en cuenta este factor y anticipar las posibles discrepancias entre los datos artificiales y reales.

### 5.3 Trabajo futuro

---

En la sección 4.3.2 se identifican las debilidades presentes en el modelo actual. Se resaltan las limitaciones relacionadas con la flexibilidad del modelo para adaptarse a variaciones en el problema y la capacidad para modificar el modelo en caso de que se necesite añadir funcionalidad.

Teniendo en cuenta las mejoras mencionadas, así como los conceptos teóricos explorados en los primeros capítulos, sería incorrecto recomendar la elaboración de un modelo más complejo para esta tarea que incorpore dichas funcionalidades. Aunque este modelo sería superior al actual desde un punto de vista académico, no tendría sentido desde una perspectiva empresarial invertir más recursos para solucionar un problema cuyo coste ahorrado sería significativamente menor que el de la creación del modelo.

Teniendo en cuenta esta realidad y enfocando el desarrollo futuro desde una perspectiva empresarial, se propone dirigir las mejoras hacia la inclusión de un mayor número de procesos que puedan beneficiarse del modelo. Para este ejemplo específico, estas áreas podrían incluir la gestión de defensas en otras facultades y escuelas de la universidad, la organización de fechas de exámenes y otras tareas que establecen un horario basado en ciertas restricciones dentro de un periodo temporal determinado.

El objetivo principal de trabajos futuros sería transformar el modelo propuesto en una versión más genérica y permitir a un número mayor de usuarios (no solo a la administración de la Facultad de Administración y Dirección de Empresas) modificar ciertas restricciones para obtener un modelo adaptado a su tarea específica. Una vez que se amplíe la base de usuarios del modelo, se podría realizar un análisis de costes para determinar si la eficiencia y flexibilidad que las mejoras propuestas en el apartado 4.3.2 podrían aportar, justificarían el coste de su desarrollo.

# Bibliografía

---

- [1] Aalst, W., Hee, K., y Wil (2004). *Workflow management - models, methods and systems*.
- [2] Andress, J. (2014). *The basics of information security: understanding the fundamentals of InfoSec in theory and practice*. Syngress.
- [3] Baraniuk, C. (2015, August 18). *How Algorithms Run Amazon's Warehouses*. BBC News. <https://www.bbc.com/future/article/20150818-how-algorithms-run-amazons-warehouses>
- [4] Barocas, S., Hardt, M., y Narayanan, A. (2023). *Fairness and Machine Learning: Limitations and Opportunities*. The MIT Press.
- [5] Beck, K., et al. (2001) *The Agile Manifesto*. Agile Alliance. <http://agilemanifesto.org/>
- [6] Bingi, P., Sharma, M.K., y Godla, J.K. (1999). *Critical Issues Affecting an ERP Implementation*. *Information Systems Management*, 16(3), 7-14. doi: 10.1201/1078/43197.16.3.19990601/31310.2
- [7] Bocij, P., Greasley, A., y Hickie, S. (2008). *Business information systems: Technology, development and management*. Pearson education.
- [8] Boyd, S. P., y Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press.
- [9] Bradford, M. (2015). *Modern ERP: Select, Implement, and Use Today's Advanced Business Systems (3rd ed.)*. Lulu.com
- [10] Brailsford, S. C., Potts, C. N., y Smith, B. M. (1999). *Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications*. *European journal of operational research*, 119(3), 557-581.
- [11] Castells, M. (2010). *The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society and Culture (2nd ed., Vol. 1)*. Wiley-Blackwell.
- [12] Ceruzzi, P. E. (2003). *A History of Modern Computing*. Cambridge: MIT Press.
- [13] Dantzig, G. B. (1990). *Origins of the simplex method*. In *A history of scientific computing* (pp. 141-151).
- [14] Edmunds, A., y Morris, A. (2000). *The problem of information overload in business organisations: a review of the literature*. *International journal of information management*, 20(1), 17-28.
- [15] Feng, L. (2007). *What is e-business*. United Kingdom: Blackwell Publishing.
- [16] Floridi, L., y Chiriatti, M. (2020). *GPT-3: Its nature, scope, limits, and consequences*. *Minds and Machines*, 30, 681-694.

- [17] Forbes. (2019). *The World's Biggest Public Companies, Software/Programming*. Recuperado de <https://www.forbes.com>
- [18] Fourer, R., Gay, D. M., y Kernighan, B. W. (2003). *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming (2nd ed.)*. Duxbury/Thomson Learning.
- [19] Galloway, P. D. (2006). *Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects*. Journal of construction engineering and management, 132(7), 697-711.
- [20] Gillespie, T. (2020). *Content moderation, AI, and the question of scale*. Big Data & Society. <https://doi.org/10.1177/2053951720943234>
- [21] Goertzel, B. (2014). *Artificial general intelligence: concept, state of the art, and future prospects*. Journal of Artificial General Intelligence, 5(1), 1.
- [22] Google Colaboratory. (2023). *Google Colaboratory*. Recuperado 5 junio, 2023, from <https://colab.research.google.com/>
- [23] Greenberg, H. J. (s.f.). *The Role of Software in Optimization and Operations Research*. In *Optimization and Operations Research (Vol. I)*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- [24] GVR. (2023). *ERP Software Market Size, Share & Trends Analysis Report By Function (Finance, HR, Supply Chain, Others), By Deployments, By Enterprise Size, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030*. [Electronic (PDF)]. GVR Report ID: 978-1-68038-669-1.
- [25] Howard, R. A. (1988). *Decision analysis: Practice and promise*. Management Science, 34(6), 679-695.
- [26] IEEE Standards Association. (2017). *IEEE Guide for Terms and Concepts in Intelligent Process Automation [Standard No. 2755-2017]*. IEEE
- [27] James E. Kelley, Jr., (1961) *Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis*. Operations Research 9(3):296-320.
- [28] Juran, J. M. (1986). *Universal Approach to Managing for Quality: The Quality Trilogy*.
- [29] Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons.
- [30] Krafcik, J.F. (1988) *Triumph of the Lean Production System*. Sloan Management Review, 30, 41-52.
- [31] Landes, D. S. (1969). *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [32] Macal, C. M., y North, M. J. (2010). *Tutorial on agent-based modelling and simulation*. Journal of Simulation, 4(3), 151-162.
- [33] Madakam, S., Ramaswamy, R., y Tripathi, S. (2015). *Internet of Things (IoT): A Literature Review*. Journal of Computer and Communications, 3, 164-173. doi: 10.4236/jcc.2015.35021
- [34] Mitchell, T. M. (2007). *Machine learning (Vol. 1)*. New York: McGraw-hill.

- [35] Monk, E. F., y Wagner, B. J. (2013). *Concepts in Enterprise Resource Planning*. Course Technology Cengage Learning 1.
- [36] Nethercote, N., Stuckey, P. J., Becket, R., Brand, S., Duck, G. J., y Tack, G. (2007). *MiniZinc: Towards a standard CP modelling language*. In International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (pp. 529-543). Springer Berlin Heidelberg.
- [37] Orlicky, J. (1975). *Material Requirements Planning: The New Way of Life in Production and Inventory Management*. McGraw-Hill, New York
- [38] Porter, M. E. (2004). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance (Revised edition)*. The Free Press.
- [39] PwC. (s.f.). *Robotic Process Automation for Internal Audit*. Recuperado de <https://www.pwc.com/us/en/services/consulting/cybersecurity-risk-regulatory/library/robotic-process-automation-internal-audit.html>
- [40] Qian, L., Luo, Z., Du, Y., y Guo, L. (2009). *Cloud computing: An overview*. In Cloud Computing: First International Conference, CloudCom 2009, Beijing, China, December 1-4, 2009. Proceedings 1 (pp. 626-631). Springer Berlin Heidelberg.
- [41] Russell, S. J., Norvig, P., y Davis, E. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall.
- [42] Salesforce. (2021). *Employee satisfaction increases as a result of automation in the workplace [Comunicado de prensa]*. Recuperado de <https://www.zdnet.com/article/automation-leads-to-lower-employee-stress/>
- [43] Sodhi, M. S., y Choi, T. Y. (2022). *Don't Abandon Your Just-In-Time Supply Chain, Revamp It*. Harvard Business Review. Recuperado de <https://hbr.org/2022/10/dont-abandon-your-just-in-time-supply-chain-revamp-it>
- [44] Stone, B. (2013). *The Everything Store: Jeff Bezos and the Age of Amazon*. Little, Brown and Company.
- [45] Takeuchi, H., y Nonaka, I. (1986). *The New New Product Development Game*. Harvard Business Review, 64(1), 137-146.
- [46] Talbi, E. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons.
- [47] Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M., y Kabli, M. R. (2020). *Project, program and portfolio management in large Dutch corporations—differences and similarities between PERT and CPM*. International Journal of Managing Projects in Business, 13(2), 214-236.
- [48] Tasioulas, J. (2022). *Artificial Intelligence, Humanistic Ethics*. Daedalus, 151(2), 232-243. [https://doi.org/10.1162/daed\\_a\\_01912](https://doi.org/10.1162/daed_a_01912)
- [49] Treacy, M. y Wiersema, F. D. (1995). *The Discipline of Market Leaders: Choose Your Customers, Narrow Your Focus, Dominate Your Market*. HarperCollins.
- [50] Tsang, E. P. (2002). *Constraint satisfaction in business process modelling*. Technical Report CSM-359, University of Essex, Colchester, UK, Tech. Rep.
- [51] UiPath. (2021, May 20). *New Study Finds Majority of Global Office Workers Crushed by Repetitive Tasks, Stifled From Pursuing More Fulfilling Work [Press release]*. Business

- Wire. <https://www.businesswire.com/news/home/20210520005067/en/New-Study-Finds-Majority-of-Global-Office-Workers-Crushed-by-Repetitive-Tasks-Stifled-From-Pursuing-More-Fulfilling-Work>
- [52] United Nations. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: UN Publishing .
- [53] Wight, O. (1984). *Manufacturing resource planning: MRP II: unlocking America's productivity potential*. Wiley.
- [54] Williams, H. P. (2013). *Model Building in Mathematical Programming (5th ed.)*. Wiley.
- [55] Winkie, L. (2022, May 10). *Exhausted workers, polluting journeys: how unethical is next-day delivery?*. The Guardian. Recuperado de <https://www.theguardian.com/technology/2022/may/10/next-day-delivery-unethical-amazon-workers-pollution>
- [56] Womack, J. P., Jones, D. T., y Roos, D. (2007). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production– Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars That Is Now Revolutionizing World Industry*. Simon and Schuster.
- [57] Wright, P. M., McMahan, G. C., y McWilliams, A. (1994). *Human resources and sustained competitive advantage: A resource-based perspective*. *International Journal of Human Resource Management*, 5(2), 301-326.

---

APÉNDICE A

## Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

---

### A.1 Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

---

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.	X			
ODS 5. Igualdad de género.			X	
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.		X		
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

### A.2 Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto

---

Este trabajo está relacionado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015). Primero, se trabaja el ODS 4 de "Educación de Calidad", ya que busca mejorar un proceso de una institución educativa, aportando una mejora de eficiencia y calidad a la programación horaria que ofrece la universidad.

También se cubre el ODS 9 de "Industria, Innovación e Infraestructura". El modelo propuesto busca realizar una innovación y ofrecer una implementación mejorada que pueda mejorar la gestión de recursos. Los capítulos teóricos también se enfocan en la aplicación de nuevas tecnologías, explorando como los avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de nuevos modelos de gestión de recursos.

Además, esta perspectiva también se alinea con el ODS 12, "Producción y Consumo Responsables", ya que explora una gestión más eficiente de los recursos, buscando estrategias y metodologías que minimizan los malgastos y mejoran el bienestar de aquellas personas que las utilizan.

Finalmente, la redacción de esta memoria tiene en consideración el ODS 5, "Igualdad de Género", esto se debe al esfuerzo que se ha dedicado a incluir un lenguaje inclusivo a lo largo del documento. En el campo de la gestión operativa, en tanto que se desarrolla en mayor medida entre los niveles superiores de gestión, la presencia masculina es mayoritaria. Por lo tanto, se pretende impulsar, a través del lenguaje inclusivo, la participación de las mujeres en el ámbito de la gestión operativa, y también informar a la sociedad en general de su existencia en este campo.

Es importante destacar que el uso de un lenguaje inclusivo ha buscado mantener un equilibrio con la economía del lenguaje, evitando una lectura complicada o repetitiva. Se han buscado conceptos neutrales y colectivos que abarquen a ambos sexos.

---

---

## APÉNDICE B

# Implementación de la solución

---

### B.1 Cálculos de complejidad como número de soluciones

---

#### B.1.1. Complejidad de las variables del problema

Para evaluar la complejidad del problema y poder contrastar la eficiencia de distintas técnicas resulta útil explorar el tamaño del espacio de soluciones para el problema.

Se comienza por una definición simplificada del problema que considera las siguientes variables:

$N$  es el número de intervalos de 15 minutos que tienen los días.

$K$  es el número total de defensas en el periodo.

$D$  es el número total de días en el periodo de defensas.

Siguiendo la teoría de permutación de conjuntos se considera el número de posibles ordenamientos para las defensas en el espacio de un día como:

$$\frac{(N - 2 \cdot \frac{K}{D})!}{(N - 3 \cdot \frac{K}{D})!}$$

Es decir, el conjunto total de elementos,  $(N - 2 \cdot \frac{K}{D})!$ , donde cada defensa cuenta como 1 único elemento, ocupando 3 intervalos del horario, dividido por aquellos elementos intercambiables que son los descansos entre las defensas,  $(N - 3 \cdot \frac{K}{D})!$ , ya que no existe diferencia entre dos intervalos de descanso pero sí entre dos defensas.

Para obtener las combinaciones totales de horarios de tribunales, cada día añadido en el horario añade esta misma cantidad de posibilidades. Es decir, se eleva la fracción anterior al número de días en el horario.

$$\left( \frac{(N - 2 \cdot \frac{K}{D})!}{(N - 3 \cdot \frac{K}{D})!} \right)^D$$

Se destaca que esta representación asume que a mayor cantidad de días, más dispersa es la disponibilidad de los tribunales. Normalmente, este comportamiento no se reproduciría en la realidad y por lo tanto los resultados que el modelo genera pueden ser menores a los reales. Esta simplificación se ha llevado a cabo para reducir el tamaño de las variables y limitar la complejidad de la ecuación, ya que su añadido no modificaría las conclusiones que se realizan en los apartados correspondientes.

Para terminar el modelo de representación de la complejidad, se añade las posibles distribuciones de defensas en el espacio de los tribunales, simbolizado por  $K$ . Es decir, un total máximo de  $K!$  combinaciones. De manera similar al apartado anterior, esto es una simplificación ya que no considera posibles limitaciones como cuando un miembro de tribunal también tutoriza un trabajo. En este caso, la simplificación aumenta la complejidad ya que añadir estas restricciones disminuiría el espacio de soluciones. Sin embargo, los cambios no modifican las conclusiones del modelo, y sus efectos son similares a los de la simplificación anterior.

$$C = K! \cdot \left( \frac{(N - 2 \cdot \frac{K}{D})!}{(N - 3 \cdot \frac{K}{D})!} \right)^D$$

Para visualizar el efecto que tienen las 3 variables principales  $\{N, K, D\}$  sobre el modelo, se reordena la función de complejidad para modelar los efectos sobre  $C$  del cambio de cada variable:

$$\begin{aligned} \text{complejidad del número de intervalos diarios: } f_N(x > \frac{K}{D} \cdot 3) \\ &= K! \cdot \left( \frac{(x - 2 \cdot \frac{K}{D})!}{(x - 3 \cdot \frac{K}{D})!} \right)^D \\ \text{complejidad del número de días: } f_D(x > \frac{K \cdot 3}{N} \cdot 3) \\ &= K! \cdot \left( \frac{(N - 2 \cdot \frac{K}{x})!}{(N - 3 \cdot \frac{K}{x})!} \right)^x \\ \text{complejidad del número de defensas: } f_K(x > \frac{N \cdot D}{3}) \\ &= x! \cdot \left( \frac{(N - 2 \cdot \frac{x}{D})!}{(N - 3 \cdot \frac{x}{D})!} \right)^D \end{aligned}$$

La complejidad del número de defensas presenta un problema añadido, ya que no se puede incrementar el número de defensas sin incrementar la disponibilidad horaria para ellas. Debido a esto, es necesario modificar la formulación para que incluya estas variaciones y pueda mostrar la complejidad de un aumento de defensas si el resto de parámetros aumentan para permitir el cumplimiento de las restricciones, este valor que representa el tamaño general del problema se puede representar como  $M$ . Reescribiendo la función de complejidad en términos de  $M$  sustituyendo  $N, K$  y  $D$ , dónde  $N = M \cdot 3 + 2$ ,  $D = M$  y  $K = M^2$ :

$$f_M(x) = x^2! \cdot \left( \frac{(x + 2)!}{2!} \right)^x$$

Graficar las 3 funciones permite visualizar el incremento de complejidad según el parámetro del problema.

### B.1.2. Complejidad del problema completo

La complejidad del problema completo es igual a la complejidad calculada por el problema. Es decir, está definida por la fórmula:

$$f_M(x) = x^2! \cdot \left( \frac{(x+2)!}{2!} \right)^x$$

### B.1.3. Complejidad del problema en dos partes

Se modifica la ecuación del tamaño-complejidad para reflejar los cambios del modelo donde la distribución de trabajos se realiza separadamente de los trabajos:

$$f_M(x) = x^2! + \left( \frac{(x+2)!}{2!} \right)^x$$

### B.1.4. Complejidad del problema con horario fijo

Se modifica la ecuación del tamaño-complejidad para reflejar los cambios del modelo donde el horario se fija y por lo tanto la variable  $N$  no existe:

$$f_M(x) = (2 \cdot x)!$$

## B.2 Aplicación práctica del modelo

---

En la implementación práctica de ambos modelos, se utilizan diferentes solvers para su resolución: Gecode y Chuffed.

Gecode es un conjunto de herramientas para la programación de restricciones de propósito general, que ofrece un modelo de programación declarativa. En cambio, Chuffed es un solver para la programación de restricciones de la clase "lazy clause generation" (LCG). Este utiliza un enfoque de generación de cláusulas de manera perezosa para solucionar problemas de satisfacción de restricciones.

Ambos solvers están incorporados en el sistema de MiniZinc, lo que significa que la formulación del modelo se puede aplicar indistintamente a cada uno. Para la primera parte de la resolución, tanto Gecode como Chuffed proporcionan resultados satisfactorios sobre el modelo en un intervalo de tiempo razonable. Sin embargo, para el segundo modelo, Gecode no logra encontrar una solución óptima en un tiempo razonable, mientras que Chuffed la encuentra en menos de 2 segundos. Las diferencias entre ambos modelos podrían deberse a que la formulación del primero incluye una gran variedad de datos y restricciones, mientras que la formulación del segundo es más compacta y directa.