Contenido

[RESUMEN DEL PROYECTO 2](#_Toc469239315)

[1. Introducción 3](#_Toc469239316)

[1.1. Presentación 3](#_Toc469239317)

[1.2. Justificación 4](#_Toc469239318)

[1.3. Objetivos 9](#_Toc469239319)

[1.4. Metodología 10](#_Toc469239320)

[1.5 Estructura del documento 11](#_Toc469239321)

[2. Optimización 12](#_Toc469239322)

[2.1. Heurística y algoritmos heurísticos 13](#_Toc469239323)

[2.2. Ventajas e inconvenientes del método heurístico 14](#_Toc469239324)

[3. Descripción del sistema 15](#_Toc469239325)

[3.1. Generalidades 15](#_Toc469239326)

[3.2. La planta 15](#_Toc469239327)

[3.3. El proceso 16](#_Toc469239328)

# **RESUMEN DEL PROYECTO**

Los problemas relacionados con la asignación de recursos humanos y no humanos a diferentes tareas en un problema de secuenciado con recursos limitados aparecen cada vez con mayor asiduidad en la industria. Dentro de este contexto, los encargados técnicos encargados de esta planificación deben encontrar soluciones que reduzcan costes, horas de trabajo u otros criterios.

En numerosas ocasiones, este trabajo se hace a mano, sin embargo, este método no resulta efectivo pues puede conducir a errores y, para el caso de problemas de gran tamaño, como los que se tratan en este trabajo, resulta impracticable. Estos errores son fatales para las empresas en general y más si cabe en el ámbito de la industria aeronáutica, que es el que nos ocupa en este trabajo, pues los costes en materias primas, mano de obra, maquinaria, entre otros, son muy elevados.

En este proyecto enmarcado dentro de otro de mayor magnitud llevado a cabo por una compañía aeronáutica se desarrolla una herramienta basada en la programación de un heurístico con el que se busca encontrar una solución lo suficientemente buena con un tiempo de ejecución reducido. Esto contrasta con otros métodos como la programación lineal entera, que si bien permite obtener soluciones en principio más cercanas al optimo, tiene como contrapartida un tiempo de ejecución muy elevado.

El objetivo de este heurístico y este trabajo de fin de grado es la obtención de una asignación detallada de los recursos humanos y no humanos de manera que el tiempo entre el comienzo y la finalización del trabajo sea mínimo una vez fijados los recursos.

Este tipo de problema de optimización es conocido como “Resource Constraint Scheduling Project” en la literatura, es decir, problema de secuenciado con restricciones en los recursos. Existe otro enfoque para los problemas de secuenciado, el Time Constraint Scheduling Project, en el que fijado el tiempo en el que el trabajo debe estar listo, se asignan los recursos necesarios. Este segundo enfoque resulta ser el más habitual, sin embargo, no tiene tanto sentido aplicarlo a la industria aeronáutica.

El motivo es que en esta industria no es tan importante tener el pedido lo más pronto posible, pues el tiempo para tenerlo listo suele ser amplio, si no minimizar los recursos empleados, en vistas a ahorrar costes. El enfoque empleado para este problema, al no ser el habitual y no haber sido muy estudiado, añade valor al trabajo desarrollado.

# Introducción

## Presentación

La producción es la elaboración de un producto mediante el trabajo. En vistas del crecimiento demográfico y, por tanto, de las cantidades demandadas por el mercado, la producción juega un papel vital en nuestra sociedad. Además, es muy importante para las empresas mejorar y producir cada vez a precios más bajos, debido a la aparición constante de nuevos competidores en el mercado. Por estos motivos, resulta tan importante optimizar la producción, es decir, producir la mayor cantidad posible de producto a bajo coste, mejorando así, el rendimiento.

En este trabajo de fin de grado se ha abarcado el desarrollo y la programación de un modelo de optimización mediante un heurístico que permita obtener secuencias de fabricación de piezas aeronáuticas que se ajusten a las necesidades de la empresa, en un tiempo reducido, con su respectivo diagrama de Gantt de salida correspondiente a la programación de las tareas a realizar de una serie de piezas. Cabe destacar que este proyecto forma parte de un conjunto mayor, junto a otros desarrollados en diversas áreas de la empresa, que involucran otros temas como la simulación o la programación de problemas estocásticos.

## Justificación

En este contexto, una empresa aeronáutica, debido al elevado coste de la materia prima, la mano de obra y la maquinaria para la manufactura necesita de herramientas muy potentes para gestionar la producción. Este heurístico, resulta muy útil para valorar la acometida de nuevos proyectos dentro de la empresa, pues ofrece soluciones muy buenas en un tiempo reducido, lo que permite comprobar si el desarrollo de un nuevo producto va a ser viable o no.

Una vez comprobada la viabilidad del producto, se podría desarrollar una herramienta más potente que este heurístico para tratar de obtener soluciones más cercanas al optimo, si bien, y como veremos a lo largo de la exposición de este trabajo, el heurístico obtiene soluciones lo suficientemente buenas, pues, por ejemplo, en la realidad no es posible que los trabajadores estén trabajando el 100% del tiempo que comprende su jornada laboral, siendo necesario establecer descansos. El tiempo real que un trabajador puede estar operando podría considerarse como el 90% de su jornada laboral y este heurístico obtiene soluciones de hasta un 92% de la ocupación (revisar).

Para dar más soporte a la importancia del desarrollo de este heurístico, vamos a resolver de manera manual y a modo de ejemplo, un problema de secuenciado de ocho tareas.

TAREA 6

TAREA 3

TAREA 4

TAREA 5

TAREA 2

TAREA 8

TAREA 7

TAREA 1

**Figura 1**: Esquema del “case 8.3”. Los recuadros **rellenos de azul** corresponden a las tareas que han de ejecutarse con **time-lag=0** (de manera consecutiva) y los recuadros con los **bordes más gruesos** corresponden a las **tareas que no pueden ejecutarse a la vez**.

El secuenciado de estas ocho tareas reviste una dificultad adicional, además de las restricciones habituales, existen otras dos adicionales, una que fuerza a una tarea a tener que ser programada inmediatamente después que otra, y otra que impide que dos tareas se ejecuten en paralelo.

El criterio para secuenciar una tarea antes que las demás, será establecido mediante una regla de prioridad, GRPW, es decir, “Greatest Rank Position Weight”, que significa, mayor ranking según el peso. Esta regla consiste en asignar, a la tarea que esté en el conjunto de tareas que se pueden programar por haberse completado ya todos sus predecesores, un peso, siguiendo como criterio la suma de la duración de la tarea y la de todos sus sucesores. De esta manera, se asignaría la tarea con un mayor peso, es decir, con la mayor de la suma de su duración y la de sus predecesores.

Esta es la regla empleada para este trabajo, y el motivo de su elección será justificado en capítulos posteriores.

3

8

15

TAREA 6

TAREA 3

TAREA 4

TAREA 5

TAREA 2

TAREA 8

TAREA 7

TAREA 1

3

5

11

18

10

**Figura 2**: Esquema del “case 8.3”. En esta imagen se pueden ver los valores de los pesos de cada tarea.

Cada tarea, consume durante su duración operarios de un tipo, siendo posible en algunas tareas emplear operarios de los dos tipos. Cada uno de los tipos de operarios es un recurso que está limitado. Además, cada tarea sólo puede resolver en una de las dos áreas disponibles según sean las especificaciones de esa tarea. Cada área tiene una capacidad máxima. Esto añadiría una complejidad aún mayor si cabe para la resolución manual. A modo de simplificación y para este ejemplo, no se tendrán en cuenta esas restricciones de recursos.

Siguiendo esta regla de prioridad, y teniendo en cuenta las restricciones y los recursos necesarios para resolver cada tarea, y las simplificaciones asumidas, se procede a su resolución manual por etapas:

1. Se programa la tarea 2, pues es la de mayor peso, de entre las tareas 1 y 2, que son las que se pueden programar en esta etapa, entre los instantes 0 y 2.
2. Se programa la tarea 1, entre los instantes 0 y 3.
3. Se programa la tarea 5, entre los instantes 2 y 4.
4. Se programa la tarea 4, entre los instantes 2 y 4, e inmediatamente después, se debería programar la tarea 6 entre los instantes 4 y 7, pues viene exigido por la restricción. Sin embargo, esto no es posible ya que la tarea 3, predecesora de la 6, aún no ha sido programada. Esta es la primera dificultad que surge al resolverlo a mano. Por tanto, no se puede programar la tarea 4 todavía.
5. Se programa la tarea 3, entre los instantes 3 y 8. La tarea 6, no podrá comenzar hasta el instante 8, lo que añade otra complicación.
6. Se programa la tarea 4 de manera que esta tiene que finalizar en el instante 8, por tanto, se programa entre los instantes 6 y 8, pese a que habría sido factible programarla antes de no existir la restricción entre las tareas 4 y 6.
7. Se programa la tarea 6 entre los instantes 8 y 11
8. Se programa la tarea 7, esta no puede coincidir en su intervalo temporal en la tarea 6, pues como ya se comentó tienen una restricción que lo impide. La tarea 7 se secuencia entre los instantes 11 y 13.
9. Por último, la tarea 8 se secuencia entre los instantes 11 y 14 obteniéndose entonces un tiempo de duración del proyecto de 14 unidades de tiempo.

Como hemos visto, la resolución manual resulta engorrosa y complicada, pese a las simplificaciones realizadas. Además, esta resolución es impracticable para casos con más tareas y más restricciones. En este proyecto se resuelve el secuenciado de proyectos de hasta 204 tareas mediante el heurístico, lo que sería imposible de manera manual.

Como añadido, esta resolución manual es determinista, lo que puede conducir a la mejor solución, o, lo que es mucho más probable, a una solución peor. Esto es debido a que la elección para secuenciar prioritariamente la tarea con mayor peso, si es posible, no tiene por qué proporcionar la mejor solución. A medida que crece el tamaño del proyecto este hecho adquiere más relevancia.

Una de las bondades del heurístico es que no es determinista, y permite explorar un amplio conjunto de soluciones, quedándose con la mejor dentro de ese conjunto. Como veremos más adelante, se empleará la aleatorización sesgada, de cara a obtener esa variabilidad en las soluciones.

Una vez expuestas las bondades de la herramienta a desarrollar, se exponen con detenimiento los objetivos de este proyecto

## 1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es **la implementación de una herramienta de apoyo basada en un modelo de optimización heurístico que permita la obtención de la planificación de la producción de una línea de fabricación de componentes aeronáuticos de modo que permita atender la demanda establecida**. Esto se logra a través de la **asignación de operarios** a las distintas tareas correspondientes a la planificación de la producción requerida por el cliente, buscando la minimización del tiempo de duración del proyecto fijados unos recursos. Para lograr dicho objetivo se definieron los siguientes objetivos específicos que permitieron, a través de ellos, la consecución del proyecto completo:

* **Desarrollar un heurístico** que obtenga las mejores soluciones posibles en un período corto de ejecución.
* **Desarrollo** de la salida de manera que se obtiene un Gantt que contiene el plan de producción.
* **Evaluar el impacto** del uso del modelo, analizando soluciones para distinto número de trabajadores, empleando diferentes modos de manera aleatoria, de manera determinista o siguiendo otros criterios.
* **Analizar la capacidad del modelo**, esto es, incrementando el número de iteraciones o variando el criterio de parada, observar a partir de qué punto la herramienta computa en tiempos inaceptables.

## Metodología

El proyecto se ha desarrollado en diez etapas claramente diferenciadas. Esta división está basada en la cantidad de información manejada y las posibilidades de hacer comprobaciones de manera conjunta con la empresa aeronáutica.

En el desarrollo del proyecto se pudieron diferenciar:

1. Lectura de literatura relacionada con los métodos heurísticos.
2. Repaso del lenguaje de programación C y aprendizaje de nuevas herramientas del programa necesarias para el desarrollo del proyecto.
3. Recogida de información acerca de los requerimientos, modo de trabajo, procesos y características del trabajo realizado en la planta.
4. Realización de un primer heurístico para trabajos de pocas tareas a modo de práctica previa al desarrollo del programa de este proyecto.
5. Interpretación y elaboración de los requerimientos y criterios a partir de la información obtenida para el desarrollo del heurístico definitivo.
6. Investigación en profundidad de la literatura disponible para obtener la mejor forma de realizar el heurístico
7. Elaboración del modelo con el software C.
8. Verificación del modelo en funcionamiento, asegurando la correcta representación de la realidad y la factibilidad de las soluciones obtenidas.
9. Elaboración de la salida de datos en C para su uso en R de manera que se obtiene el plan de producción en un Gantt lo que lo hace muy visual y comprensible para los trabajadores de la fábrica.
10. Comparación de las soluciones obtenidas con el heurístico con las soluciones manuales empleadas por la empresa aeronáutica.

En todas las etapas del proyecto, se realizaron consultas con uno de los encargados del proyecto mayor de la compañía aeronáutica para conocer si el proyecto se estaba elaborando de la forma deseada y para aplicar posibles modificaciones o añadir nuevos aspectos

## Estructura del documento

Aún por completar (primero escribir todo y luego hacer este apartado)

# 2. Optimización

En este capítulo se lleva a cabo una breve exposición de lo que comprende la programación lineal, la ciencia heurística, los algoritmos heurísticos y por último sus ventajas e inconvenientes.

Para ello, se ha consultado extensa bibliografía como pueden ser: *An Experimental Investigation of Resource Allocation in Multiactivity Projects* de E. M. Davies (en adelante “Davies[1973]”) y *Serial and parallel resource-constrained projet scheduling methods revisited: Theory and computation* de Rainer Kolisch (en adelante “Kolisch[1996]”).

La optimización se define como el [proceso](http://www.economia48.com/spa/d/proceso/proceso.htm) que conduce a la solución óptima de un problema. Con solución óptima queremos decir mejor (en algún sentido) que cualquier otra solución  
  
En [programación matemática](http://www.economia48.com/spa/d/programacion-matematica/programacion-matematica.htm), en general, y en [programación lineal](http://www.economia48.com/spa/d/programacion-lineal/programacion-lineal.htm), en particular, se denomina optimización al [proceso](http://www.economia48.com/spa/d/proceso/proceso.htm) sistemático de [resolución](http://www.economia48.com/spa/d/resolucion/resolucion.htm) seguido para alcanzar la solución óptima ([máximo](http://www.economia48.com/spa/d/maximo/maximo.htm) o [mínimo](http://www.economia48.com/spa/d/minimo/minimo.htm)) de la [función](http://www.economia48.com/spa/d/funcion/funcion.htm) [objetivo](http://www.economia48.com/spa/d/objetivo/objetivo.htm) y [verificar](http://www.economia48.com/spa/d/verificar/verificar.htm) las restricciones de todo [tipo](http://www.economia48.com/spa/d/tipo/tipo.htm) que limitan la consecución de ese [objetivo](http://www.economia48.com/spa/d/objetivo/objetivo.htm).

Sin embargo, la gran mayoría de problemas reales no pueden ser resueltos con algoritmos deterministas, como los que emplea la programación lineal, bien porque sus características no han permitido el desarrollo de ninguna técnica "exacta" que asegure la localización de la solución óptima, o porque aun pudiendo ser las técnicas exactas utilizadas, el tiempo necesario para obtener la solución del problema resulte prohibitivo. La alternativa para estos casos, la constituyen los métodos heurísticos, que mediante diferentes mecanismos buscan una solución "buena" (aunque no necesariamente óptima) en un tiempo razonable.

## 2.1. Heurística y algoritmos heurísticos

La heurística es la ciencia que estudia los procesos de decisión respecto a un campo de conocimiento concreto, como son las estrategias cognitivas. Su contrapartida formal en computación es el algoritmo. La palabra heurística proviene de la palabra griega “heuriskein” que significa descubrir, encontrar. Por heurística entendemos una estrategia, método, criterio o truco usado para hacer más sencilla la solución de problemas difíciles.

El conocimiento heurístico es un tipo especial de conocimiento usado por los humanos para resolver problemas complejos. En este caso el adjetivo heurístico significa medio para descubrir. Debido a la existencia de algunos problemas importantes con un gran interés práctico difíciles de resolver, comienzan a surgir algoritmos capaces de ofrecer posibles soluciones que, aunque no consiguen el resultado óptimo, sí que se acercan en un tiempo de cálculo razonable.

Estos algoritmos están basados en el conocimiento heurístico y por lo tanto reciben el nombre de algoritmos heurísticos. Por lo general, los algoritmos heurísticos encuentran buenas soluciones, aunque a veces no hay pruebas de que la solución pueda hallarse en un tiempo razonablemente corto o incluso de que no pueda ser errónea. Frecuentemente pueden encontrarse casos particulares del problema en los que la heurística obtendrá resultados muy malos o que tarde demasiado en encontrar una solución.

Un método heurístico es un conjunto de pasos que deben realizarse para identificar en el menor tiempo posible una solución de alta calidad para un determinado problema. Al principio esta forma de resolver problemas no fue bien vista en los círculos académicos, debido fundamentalmente a su escaso rigor matemático. Sin embargo, gracias a su interés práctico para solucionar problemas reales fue abriendo poco a poco las puertas de los métodos heurísticos, sobre todo a partir de los años 60.

El método heurístico conocido como “IDEAL”, formulado por Bransford y Stein (1984), incluye cinco pasos: Identificar el problema; definir y presentar el problema; explorar las estrategias viables; avanzar en las estrategias; y lograr la solución y volver para evaluar los efectos de las actividades (Bransford & Stein [1984]). El matemático Polya (1957) también formuló un método heurístico para resolver problemas que se aproxima mucho al ciclo utilizado para programar computadores.

Actualmente las versiones matemáticas de métodos heurísticos están creciendo en su rango de aplicaciones, así como en su variedad de enfoques. Nuevas técnicas heurísticas son utilizadas a diario por científicos de computación, investigadores operativos y profesionales, para resolver problemas que antes eran demasiado complejos o grandes para las anteriores generaciones de este tipo de algoritmos

## 2.2. Ventajas e inconvenientes del método heurístico

Las principales ventajas y desventajas del método heurístico son:

* Permite obtener un conjunto muy amplio de soluciones, quedándose con la mejor, siendo esta normalmente lo suficientemente cercana al óptimo.
* Si no se conoce el óptimo del problema se puede obtener una solución del problema mediante el método heurístico demasiado alejada de un buen valor, siendo esto indeseable.
* Si se necesita un tiempo demasiado elevado para la resolución del heurístico se estaría violando uno de los principios fundamentales de los algoritmos heurísticos, que su resolución se haga en un tiempo reducido.
* Los métodos heurísticos generalmente por su tipo de búsqueda nos pueden conducir a errores u operaciones equivocadas, aunque raras veces aparecen los peores casos en la práctica.
* Algunos heurísticos se pueden contradecir al aplicarse al mismo problema, creando con esto confusión
* Las soluciones óptimas determinadas por el heurístico pueden hacer menos exhaustiva la búsqueda.

# 3. Descripción del sistema

En este capítulo, se detallan las características más importantes del problema abordado en este proyecto. Sin duda, corresponde a la etapa de recogida de información y sirvió como base para el inicio del desarrollo del modelo. Esta información fue enviada por la compañía proveniente del proyecto de mayor tamaño que trata también este problema de secuenciado de tareas. Resultó fundamental revisar si estos datos eran correctos debido a que si se llega con errores a la fase de desarrollo del modelo, la solución obtenida no tendrá validez ninguna y reflejará un escenario distinto a la realidad de la factoría.

## 3.1. Generalidades

En la planta de la compañía aeronáutica se producen varios componentes para otras plantas. El proceso de producción que nos ocupa, comprende el desmontaje de aviones militares para después montarlos y así obtener un avión para uso civil (falta información)

## 3.2. La planta

Para el caso de la instancia de 204 tareas, se van a exponer las características de la planta. Para este caso, disponemos de dos áreas donde se pueden realizar las operaciones necesarias para completar las tareas. En general, el área A será la empleada por los trabajadores Mecánicos, y el área B, por los trabajadores Estructurales. Tanto la cantidad de trabajadores, como la capacidad de área de cada tipo, están limitadas.

## 3.3. El proceso

Para este mismo caso de las 204 tareas, el proceso está comprendido por tareas, las cuales tienen diferentes especificaciones:

* **Duración:** tiempo durante el cual la tarea está siendo realizada en un área y por un tipo de trabajadores determinados. También se puede decir que es el tiempo durante el cual la tarea consume recursos, desde su comienzo, hasta su final.
* **Mínimo y máximo de trabajadores:** para ejecutar una tarea determinada, el número de trabajadores empleados debe estar entre el mínimo y el máximo de trabajadores permitidos para esa tarea.
* **Restricción de Precedencia:** determina el orden en el que las tareas deberán programarse, de tal manera, que una tarea no puede secuenciarse hasta que todos sus predecesores han terminado
* **Restricción “No Paralela”:** impide la ejecución de dos tareas en el mismo intervalo temporal.
* **Restricción “Consecutiva”:** fuerza la programación de una tarea a continuación de otra.
* **Modos:** algunas tareas cuentan con diferentes modos de resolución, es decir, diferentes posibilidades en cuanto a número y tipo de trabajadores, tipo de área y duración. La duración decrece de manera proporcional al número de trabajadores, esto es, a mayor número de trabajadores ejecutando la tarea, menor duración de ésta. El empleo de diferentes modos será analizado en el apartado de resultados.

El método para resolver el problema será secuenciar todas las tareas, respetando las restricciones y las capacidades de recursos disponibles. La función objetivo, será el tiempo de realización del proyecto, y se buscará minimizarlo.