**Universidad Politécnica de Madrid**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid**



**modelo heurístico para la OPtiMIZACIóN del secuenciado Aplicado a la industria aeronáutica**

Jorge Guede Barcenilla

Tutores: Álvaro García Sánchez y Raúl Pulido Martínez

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

U.D. Ingeniería de Organización y Logística

Dpto de Ing. Organización, Administración de Empresas y Logística

FEBRERO 2017

It's the job that's never started as takes longest to finish.

John Ronald Reuel Tolkien

# Resumen

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 el sector industrial. Dentro de este contexto, los encargados técnicos responsables 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 de tipo NP-complejo 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, 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 de generación de secuenciados con el que se busca encontrar una solución lo suficientemente buena con un tiempo de ejecución reducido. Este método contrasta con otros, como la programación lineal entera, que permite obtener soluciones en principio más cercanas al óptimo, teniendo como contrapartida un tiempo de ejecución muy elevado.

El objetivo del heurístico desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado es la obtención de una asignación detallada de los recursos humanos y no humanos para una línea de producción de una planta aeronáutica 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 en la literatura como RCSP, “Resource Constraint Scheduling Project”, es decir, problema de secuenciado con recursos limitados. Existe otro enfoque para los problemas de secuenciado, el TCSP, “Time Constraint Scheduling Project”, en el que fijado el tiempo en el que el proyecto 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 estudiado en profundidad, añade valor al trabajo desarrollado.

El núcleo de la mayoría de métodos de secuenciado es el “Schedule Generation Schemes” (SGS), o lo que es lo mismo, sistema de generación de secuencias. En algunos casos la generación de las programaciones destaca por emplear reglas de prioridad para decidir la tarea a secuenciar. Este es el caso que se trata, dando lugar a un heurístico RCSP con secuenciado basado en prioridad.

Los programas de generación de secuenciados utilizan un enfoque paso a paso para construir un horario factible a partir de uno parcial. Esta ampliación progresiva del horario puede hacerse siguiendo dos enfoques: “SGS activity-oriented series” donde una actividad es programada en cada paso, o “SGStime-oriented parallel” donde en cada paso un instante de tiempo es considerado y varias actividades pueden ser incluidas en el programa. El enfoque que se emplea es el “SGS activity-oriented series”, que se traduce como sistema de generación de secuenciado en serie enfocado a la actividad o tarea.

Además de la aplicación de la regla de prioridad, se establecerá otro filtro para el secuenciado, la “Biassed Randomization” o aleatorización sesgada, buscando obtener la variabilidad de soluciones requerida, pues no siempre el camino más previsible es aquel que conduce a un óptimo o a una solución buena, si no que se deben explorar el mayor número de posibilidades, siendo ésta una de las bondades de un heurístico.

En resumen, el enfoque empleado para resolver el problema RCSP será un heurístico basado en prioridad y con aleatorización sesgada, con un sistema de generación de secuenciado en serie. Los motivos de estas decisiones serán justificados a lo largo del escrito.

Para implementar este heurístico, se emplea el software de programación C, una herramienta ampliamente utilizada y que cuenta con una enorme comunidad de usuarios. Para el tratamiento de los datos de salida de este programa implementado en C, se utilizará el software estadístico R. Esta herramienta goza de una gran popularidad hoy en día en el ámbito empresarial, académico y científico para realizar tareas relacionadas con el tratamiento de datos pues pese a su sencillez es muy potente y aúna muchas de las funciones que ofrecen varios programas de tratamiento de datos por separado en un único programa.

La entrada de datos al programa implementado en C serán tres instancias proporcionadas por una compañía aeronáutica correspondientes a casos reales, que constan respectivamente de 204, 159 y 91 tareas. Cada tarea puede tener diferentes modos de resolución. En este proyecto se establecen varios criterios para tratar estos modos.

Estas instancias representan el desmontado de un avión militar y su posterior ensamblado obteniéndose un avión civil. Además de las restricciones de precedencia, estas instancias cuentan con una restricción adicional, la restricción “consecutive” con “time-lag= 0”, que implica que dos tareas deben programarse una a continuación de la otra y, además, con retardo cero. Las tareas “multimodo” y esta restricción adicional conducen a una mayor dificultad en la resolución de dichas instancias.

Los datos de salida más importantes obtenidos por el programa implementado en C serán:

1. Asignación detallada de los recursos humanos y no humanos necesarios para acometer cada tarea
2. Comienzo y finalización de cada tarea
3. Porcentaje de utilización de los recursos
4. Tiempo de ejecución del programa, como medida de su rendimiento y desempeño
5. Tiempo de finalización del proyecto

El programa implementado en R permitirá con esta salida de datos obtener un diagrama de Gantt en el que cada trabajador podrá ver su horario de trabajo, la tarea a realizar y el área de trabajo donde debe desarrollarla. Además, se equilibra la carga de trabajo de cada operario de manera que se evitan problemas con el Departamento de Recursos Humanos.

Se obtienen varios diagramas de Gantt pues se emplean diferentes criterios para tratar los datos de entrada en el programa implementado en C, resultando así diferentes soluciones. Se ofrecen, por tanto, diversas posibilidades siendo el cliente el que tiene la decisión entre una u otra a su conveniencia. Los resultados obtenidos en este trabajo se consideran satisfactorios y en concordancia con los buscados en el planteamiento inicial.

Tras la exposición de los resultados obtenidos, se procederá al análisis de resultados, conclusiones y exposición de futuras mejoras, dando así por terminado el Trabajo de Fin de Grado.

Palabras clave: optimización, heurístico, secuenciado, programa, prioridad y Gantt.

Códigos UNESCO:

531109 Organización de la producción

120302 Lenguajes algorítmicos

120315 Heurística

120601 Construcción de algoritmos

120711 Programación no lineal

120713 Planificación

ÍNDICE GENERAL

[Resumen i](#_Toc472272718)

[1. Introducción 1](#_Toc472272719)

[1.1. Presentación 1](#_Toc472272720)

[1.2. Justificación 1](#_Toc472272721)

[1.3. Objetivos 6](#_Toc472272722)

[1.4. Metodología 7](#_Toc472272723)

[1.5. Software empleado 8](#_Toc472272724)

[1.5.1. Lenguaje de programación C 8](#_Toc472272725)

[1.5.2. Lenguaje de programación R 9](#_Toc472272726)

[1.6. Estructura del documento 11](#_Toc472272727)

[2. Descripción del sistema y caracterización de las instancias. 12](#_Toc472272728)

[2.1. Generalidades 12](#_Toc472272729)

[2.2. La planta 12](#_Toc472272730)

[2.3. Caracterización de las instancias. 14](#_Toc472272731)

[3. Datos de entrada adicionales y requerimientos 17](#_Toc472272732)

[3.1. Datos de entrada 17](#_Toc472272733)

[3.2. Requerimientos 18](#_Toc472272734)

[4. Estado del arte y método de resolución elegido 21](#_Toc472272735)

[4.1. Problema de optimización de secuenciado 21](#_Toc472272736)

[4.2. Breve descripción del modelo en términos matemáticos 22](#_Toc472272737)

[4.3. Métodos para resolver el RCSP 24](#_Toc472272738)

[4.3.1. Métodos exactos 24](#_Toc472272739)

[4.3.2. Heurística y método heurístico 25](#_Toc472272740)

[4.3.3. Ventajas e inconvenientes del método heurístico 26](#_Toc472272741)

[4.4. Heurísticos 27](#_Toc472272742)

[4.5. Elección del sistema de generación de programaciones 27](#_Toc472272743)

[4.5.1. Sistema de generación de programaciones en serie: 28](#_Toc472272744)

[4.5.2. Sistema de generación de programaciones en paralelo: 28](#_Toc472272745)

[4.6. Reglas de prioridad 28](#_Toc472272746)

[4.7. Elección de la regla de prioridad 30](#_Toc472272747)

[4.8. Metaheurísticos 31](#_Toc472272748)

[4.8.1. Algoritmos genéticos 31](#_Toc472272749)

[4.8.2. Búsqueda tabú 31](#_Toc472272750)

[4.8.3. Optimización de Colonia de Hormigas 32](#_Toc472272751)

[4.9. Problemas similares al que trata el proyecto encontrados en la literatura 32](#_Toc472272752)

[5. Descripción del modelo 34](#_Toc472272753)

[5.1. Pseudocódigo 34](#_Toc472272754)

[5.2. Explicación del pseudocódigo 35](#_Toc472272755)

[6. Implementación del programa en C 41](#_Toc472272756)

[6.1. Introducción al modelo 41](#_Toc472272757)

[6.2. Declaración e inicialización de variables. Definición de constantes. 42](#_Toc472272758)

[6.3. Apertura del fichero de datos de entrada y almacenamiento en las variables correspondientes 44](#_Toc472272759)

[6.4. Cálculos previos 45](#_Toc472272760)

[6.4.1. Obtención del conjunto inicial de tareas a secuenciar 46](#_Toc472272761)

[6.4.2. Obtención de los pesos de cada tarea 46](#_Toc472272762)

[6.5. Programa principal 47](#_Toc472272763)

[6.5.1. Inicialización de recursos y variables de salida auxiliares 48](#_Toc472272764)

[6.5.2. Determinación de la tarea a programar 50](#_Toc472272765)

[6.5.3. Secuenciación de dicha tarea cuando sea factible 50](#_Toc472272766)

[6.5.4. Obtención de las tareas que se pueden secuenciar 51](#_Toc472272767)

[6.6. Resultado y salida de datos 51](#_Toc472272768)

[7. Implementación del programa en R 53](#_Toc472272769)

[7.1. Introducción 53](#_Toc472272770)

[7.2. Entrada de datos en R 54](#_Toc472272771)

[7.3. Salida de datos en R 58](#_Toc472272772)

[8. Experimentos desarrollados 59](#_Toc472272773)

[8.1. Introducción 59](#_Toc472272774)

[8.2. Instancia de 91 tareas 59](#_Toc472272775)

[8.3. Instancia de 159 tareas 60](#_Toc472272776)

[8.4. Instancia de 204 tareas con recursos fijados 61](#_Toc472272777)

[8.4.1. Experimentos con modos 62](#_Toc472272778)

[8.4.2. Algoritmo tipo greedy o glotón 63](#_Toc472272779)

[8.4.3. Instancia 204B 64](#_Toc472272780)

[8.5. Instancia de 204 con recursos fijados al comienzo de la ejecución 65](#_Toc472272781)

[8.5.1. Criterio de parada con porcentaje frontera y con frontera inferior 66](#_Toc472272782)

[8.5.2. Evolución del tiempo de finalización del proyecto frente al número de trabajadores 67](#_Toc472272783)

[9. Resultados y Análisis de Resultados 69](#_Toc472272784)

[9.1. Instancia de 91 tareas 69](#_Toc472272785)

[9.2. Instancia de 159 tareas 71](#_Toc472272786)

[9.3. Instancia de 204 tareas con recursos fijados 72](#_Toc472272787)

[9.3.1. Modos mínimos 72](#_Toc472272788)

[9.3.2. Modos máximos 74](#_Toc472272789)

[9.3.3. Modos máximos y mínimos alternos 76](#_Toc472272790)

[9.3.4. Modos aleatorios 78](#_Toc472272791)

[9.3.5. Algoritmo tipo greedy o glotón 80](#_Toc472272792)

[9.3.5. Instancia 204B 82](#_Toc472272793)

[9.4. Instancia de 204 con recursos fijados al comienzo de la ejecución 86](#_Toc472272794)

[9.4.1. Caso de Frontera Inferior 86](#_Toc472272795)

[9.4.2. Caso de Porcentaje de Ocupación 86](#_Toc472272796)

[9.4.3. Evolución del tiempo de finalización del proyecto frente al número de trabajadores 87](#_Toc472272797)

[9.5. Análisis de Resultados 89](#_Toc472272798)

[9.5.1. Porcentajes de ocupación 89](#_Toc472272799)

[10. Conclusiones y mejoras futuras 91](#_Toc472272800)

[10.1. Conclusiones 91](#_Toc472272801)

[10.2. Mejoras futuras 91](#_Toc472272802)

[10.2.1. Aumento de posibilidades de trabajadores para la obtención del Gantt 91](#_Toc472272803)

[10.2.2. Aumento de la cantidad de Instancias que puede resolver el código 92](#_Toc472272804)

[10.2.3. Unificación del programa desarrollado en C 92](#_Toc472272805)

[Índice de Ilustraciones 94](#_Toc472272806)

[Índice de Tablas 97](#_Toc472272807)

# 1. Introducción

## 1.1. 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 crucial en nuestra sociedad. Además, es muy importante para las empresas mejorar y producir cada vez a precios más reducidos, 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 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.

## 1.2. 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 óptimo, 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 97,5% de ocupación para los operarios de tipo Mecánico.

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, representado esquemáticamente en la Ilustración 1, y cuyas especificaciones están expresadas en la Tabla 1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tarea** | **Duración** | **MinOp** | **MaxOp** | **Estructural** | **Mecánicos** | **Área 1** | **Área 2** |
| 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 5 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 6 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 3 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Tabla 1: se adjuntan la duración, operarios mínimos (MinOp) y operarios máximos (MaxOp) necesarios para resolver cada tarea. Además, se añaden otros datos que no se emplearán para la resolución del ejemplo, significando “1” que se emplea ese recurso, y “0”, que no. Son los tipos de operarios, “Estructural” y “Mecánicos”, y las áreas de trabajo, “Area 1” y “Area 2”.

TAREA 3

TAREA 4

TAREA 6

TAREA 4

TAREA 5

TAREA 7

TAREA 2

TAREA 6

TAREA 1

TAREA 8

Ilustración 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 rojos 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. Se adjunta el esquema de la instancia ejemplo, con los pesos correspondientes a cada tarea, en la Ilustración 2.

TAREA 3

TAREA 4

TAREA 6

TAREA 4

TAREA 5

TAREA 7

TAREA 2

TAREA 6

TAREA 1

TAREA 8

15

11

18

10

5

5

3

8

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

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 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 el [Capítulo 4](#_4.7._Elección_de).

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 se 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. En la Tabla 2 se pueden ver los resultados de dicha resolución.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tarea** | **Duración** | **Peso** | **Iteración** | **Inicio** | **Final** |
| 2 | 2 | 18 | 1 | 0 | 2 |
| 1 | 3 | 15 | 2 | 0 | 3 |
| 5 | 2 | 11 | 3 | 2 | 4 |
| 3 | 5 | 8 | 4 | 3 | 8 |
| 4 | 2 | 10 | 5 | 6 | 8 |
| 6 | 3 | 3 | 6 | 8 | 11 |
| 7 | 2 | 5 | 7 | 11 | 13 |
| 8 | 3 | 3 | 8 | 11 | 14 |

Tabla 2: resultados tras la resolución manual. Se incluyen, duración, peso, número de iteración, inicio y final de tarea

Además, esta resolución manual, es impracticable para casos con más tareas y más restricciones. En este proyecto se resuelve el secuenciado de proyectos de hasta doscientas cuatro tareas mediante el heurístico, lo que sería imposible de esta forma.

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:

1. Desarrollar un heurístico que obtenga las mejores soluciones posibles en un período corto de ejecución.
2. Desarrollo de la salida de manera que se obtiene un Gantt que contiene el plan de producción.
3. 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.
4. 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.

## 1.4. 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

## 1.5. Software empleado

### 1.5.1. Lenguaje de programación C

Se ha decidido emplear, para la realización del programa, el lenguaje de programación C. Es un lenguaje de medio nivel. Los lenguajes de alto nivel se asemejan a nuestra forma de pensar, aislando al programador de los detalles técnicos, estando este tipo de lenguajes muy distante del “lenguaje máquina”. Esto hace que este tipo de lenguajes sean poco eficientes. En contrapartida, los lenguajes de bajo nivel controlan directamente la circuitería del ordenador, pudiendo obtenerse con ellos la eficiencia máxima. Sin embargo, son mucho más complicados de implementar y poco portables.

El lenguaje C busca un compromiso entre los dos extremos, y se trata de un lenguaje de nivel intermedio. Esto permite beneficiarse de las ventajas de ambos tipos de lenguajes, evitando la mayoría de los inconvenientes.

Se trata de un lenguaje de propósito general. Se ha utilizado para el desarrollo de muy diversas aplicaciones: sistemas operativos, hojas de cálculo, gestores de bases de datos...

Además, es un lenguaje portable, es decir, es independiente del hardware. Los programas escritos en C resultan fácilmente trasportables a otros sistemas.

Ventajas:

1. Es un lenguaje potente y eficiente, permitiendo obtener programas con tiempos de ejecución bajos.
2. Proporciona un completo control de cuanto sucede en el interior del ordenador.
3. Permite una amplia libertad de organización del trabajo.

Inconvenientes:

1. Es más difícil de aprender que otros lenguajes de programación como, por ejemplo, Pascal.
2. Requiere una cierta experiencia para poder sacarle el máximo rendimiento y emplear herramientas avanzadas.
3. Sin disciplina es difícil mantener el control del programa, se debe mantener un correcto indentado y hacer comentarios.

Su largo recorrido, amplía comunidad de usuarios, potencia, posibilidades y fiabilidad, son los motivos por los que se ha decidido emplear C, frente a otras opciones como Python. Se tendrá mucho cuidado en la programación, empleando indentado adecuado y usando los comentarios de manera muy frecuente.

Se ha empleado para este apartado información extraída de la página web de la Universidad de Granada ([www.decsai.ugr.es](http://www.decsai.ugr.es) 2016).

### 1.5.2. Lenguaje de programación R

**R** es un lenguaje y entorno de programación para **análisis estadístico y gráfico.**

Ventajas:

1. Es un software libre
2. Es multiplataforma, funciona en Mac, Windows, y en numerosos sistemas UNIX
3. Es de código abierto, existe una gran comunidad de voluntarios trabajando para mejorarlo, lo cual permite que sea moldeado y dirigido a cuestiones específicas. Se crean así programas y paquetes que funcionan en el entorno R. En este proyecto se emplea el paquete “ggplot2”
4. Actualizaciones continuas, la gran comunidad de usuarios hace que se actualice constantemente
5. Es una plataforma estadística, lo cual ofrece todas las técnicas de análisis de datos. Además de programar nuevos métodos y rutinas estadísticas de una manera fácil y robusta
6. Los gráficos disponibles en R son de gran calidad y de una gran versatilidad
7. Reemplaza la combinación de varios programas para el proceso de análisis de datos, por ejemplo, Excel, Minitab, SAS, SigmaPlot, entre otros
8. Se está convirtiendo en un estándar en la sociedad científica, por hacer figuras de calidad de publicación, además de poder exportarse a diferentes formatos incluido PDF

Desventajas:

1. R tiene una extensa documentación de ayuda, descripción de paquetes y de funciones, y es difícil en ocasiones encontrar información específica
2. Los mensajes de error que R muestra, no especifican los fallos que se realizan y solo un usuario experimentado puede saber a qué se deben
3. Es un lenguaje de programación en línea de comando, lo cual no involucra el uso de menús como otros programas estadísticos, esto hace que muchas personas que no están familiarizadas en la programación, tengan dificultades en migrar a R

Por estos motivos se ha elegido el lenguaje de programación R para representar la salida de los datos obtenida en C en “.txt”. Se realizarán diversas gráficas en R, como se verá en el Capítulo de resultados.

Se ha empleado para este apartado información extraída de dos sitios web (<http://rstadistica.blogspot.com.es/2015/10/VentajasDesventajasR.html> 2015) y (<https://www.genbetadev.com/formacion/r-un-lenguaje-y-entorno-de-programacion-para-analisis-estadistico> 2014).

## 1.6. Estructura del documento

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

Tras esta introducción, en el que se han expuesto los objetivos generales que aborda el proyecto, los motivos de su realización adjuntándose un ejemplo en el que se muestran las dificultades de realizar un programa de secuenciado a mano, la metodología a emplear, y el software utilizado, se ha dado una visión general de la temática que tratará el proyecto, y las herramientas que se emplearán para realizarlo, además de una primera justificación de su viabilidad. En el siguiente Capítulo se describirán las características del sistema y de las instancias.

# **2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTANCIAS.**

En este Capítulo, se detallan las características más importantes del sistema y del problema abordado en este proyecto. 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 qué si se llega con errores a la fase de desarrollo del modelo, la solución obtenida no tendrá validez y reflejará un escenario distinto a la realidad de la factoría.

## 2.1. 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. De los aviones militares, se conserva el fuselaje de forma que deben realizarse operaciones de pintado, ajuste de las alas, modificación del interior del fuselaje para añadir conexiones, chalecos salvavidas, filas de asientos, entre otros.

En el Excel proporcionado por la compañía aeronáutica, se puede comprobar que cada tarea corresponde a una operación de entre las mencionadas. El aprovechamiento de aviones militares supone un importante ahorro. Por supuesto, todo el proceso cuenta con las medidas de seguridad adecuadas y cumple los requisitos exigidos por la Unión Europea.

## 2.2. La planta

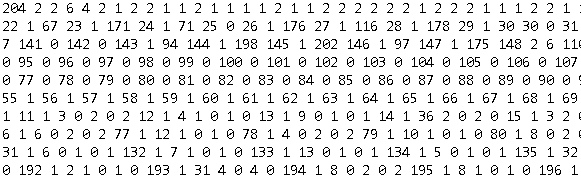
Se van a exponer las características de la planta. La planta cuenta con líneas de ensamblado que consisten en una serie de plataformas en las que los diferentes trabajos son ejecutados. La asignación de tareas a una plataforma o área en concreto responde en la mayoría de los casos a la necesidad de tener una cierta tecnología de ensamblado en dicha plataforma, y, además, a que las fijaciones no son fácilmente transportables. Por ello, deben asignarse las tareas al área que más convenga. Cada operador tendrá un perfil asignado de acuerdo a sus habilidades.

Para este caso, disponemos de diferentes áreas donde se pueden realizar las operaciones necesarias para completar las tareas. En general, habrá dos áreas y dos tipos de trabajadores activos. El Área 1 será la empleada por los trabajadores Mecánicos, que se encargan de tareas como el montado, taladrado, cortado, atornillado, entre otras, y el Área 2, por los trabajadores Estructurales, que realizan labores como la realización de la instalación eléctrica, tuberías, entre otros. También existe posibilidad de mezcla de tipo de áreas y tipos de operarios, pues, por ejemplo, el atornillado y taladrado puede ser realizado por ambos perfiles.

Tanto la cantidad de trabajadores, como la capacidad de área de cada tipo, están restringidas, pues son un recurso limitado. No se considerarán recursos extra para picos de demanda.

## 2.3. Caracterización de las instancias.

El proceso está comprendido por tareas, las cuales tienen diferentes especificaciones, enumeradas en la Ilustración 3.



1

2

3

4

6

7

8

9

10

11

Ilustración 3: datos de entrada recogidos en un “.txt”. Los recuadros están numerados de manera que se corresponden con los datos enumerados previamente.

De esta manera, el cuadro con el número uno señala el número de tareas, que en la enumeración expuesta a continuación será el primer dato. Este esquema es el que se sigue para localizar todos los datos en la Ilustración 3. Las especificaciones serán entonces, por orden de aparición:

**Numero de tareas:** número de tareas de las instancias, este número de tareas es empleado por el código para decidir cómo escanear los datos. De esta forma, no será necesario modificar el código para trabajar con instancias de distinto número de tareas

**Número de áreas:** número de áreas en las que se realizarán las tareas

**Número de trabajadores:** número de tipos de trabajadores que realizarán las tareas

**Capacidad de las áreas:** recursos de área de cada tipo disponibles. Se escanean según el número de áreas que tenga la instancia

**Capacidad de trabajadores:** recursos de trabajadores de cada tipo disponibles. Se especifican en el programa o se introducen por teclado durante su ejecución como se verá en el Capítulo de resultados

**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

**Precedencias:** restricción de precedencia. Se especifican predecesor, número de sucesores y los sucesores. 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. Se especifican predecesor, número de sucesores y los sucesores

**Restricción “Consecutiva”:** fuerza la programación de una tarea a continuación de otra. Se especifican predecesor, número de sucesores y los sucesores

**Número de modos:** es habitual que sólo haya un posible modo de resolución, pero puede haber varios

**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.

La forma de emplear los diferentes modos será analizada en el [Capítulo de Resultados](#_9.3._Instancia_de). Se especifica primero la tarea, después el número del modo y la duración de la tarea. Restan cuatro números, los dos primeros corresponden a las áreas, siendo cada número la cantidad de recursos de tipo área consumidos, en el área uno que corresponde al primer número o en el área dos, que corresponde al segundo. Los dos siguientes números representan lo mismo para el caso de los tipos de trabajador

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, fijados los recursos.

En este Capítulo, se han expuesto las características del problema y de las instancias a resolver y cómo se recogen sus datos en un “.txt” de tal manera que el código puede leerlas, sean cuales sean sus características, evitando generar programas diferentes para diferentes instancias. A continuación, se expondrán datos de entrada extra introducidos para obtener los diferentes resultados buscados en el proyecto, además de los requerimientos del cliente para efectuar el proyecto de la forma adecuada.

# 3. Datos de entrada adicionales y requerimientos

En el Capítulo anterior, se realizó una descripción de la planta, de las características del proceso y una caracterización detallada de las instancias. Este Capítulo enlaza la información otorgada por la empresa en forma de características con la interpretación de éstas en forma de requerimientos y la de sus pretensiones con objetivos del modelo.

A lo largo de esta tarea fue esencial una comunicación fluida con la empresa, puesto que, en numerosas ocasiones, las características del modelo deseadas no se implementaban de la forma requerida, por lo que ha sido preciso hacer muchas correcciones.

## 3.1. Datos de entrada

Además de los datos proporcionados por la empresa, ya expuestos en el [Capítulo 2](#_2.3._Caracterización_de), será necesario introducir otros datos de cara a la experimentación. Datos de entrada extra:

1. Porcentaje de ocupación global frontera
2. Tiempo de ciclo (que determina el “Lower Bound”)
3. Variación en el número de trabajadores
4. Método de selección de modos (aleatorio, máximo-mínimo, entre otros)

Estos aspectos serán tratados en profundidad en el [Capítulo de Resultados](#_9._Resultados_y). Pueden ser introducidos por teclado durante la ejecución del programa o estar directamente insertados en el código.

## 3.2. Requerimientos

Tras la interpretación de los datos proporcionados, en este apartado se muestran los requerimientos pedidos por la compañía, de obligado cumplimiento para la correcta implementación del modelo.

****Requerimiento**** 1

Implementar un programa que sirva para resolver el problema que nos ocupa en diferentes casos, como, por ejemplo, instancias con distinto número de tareas, distinto número de áreas, de capacidad de áreas, entre otros.

Requerimiento 2

Implementación del heurístico de manera que el criterio para la selección de una tarea sea una regla de prioridad.

Requerimiento 3

Aplicación de aleatorización sesgada, esencial para que el heurístico funcione de la manera deseada, pudiendo así obtener un gran número de soluciones.

Requerimiento 4

Claridad y simplicidad en el código desarrollado, uso de comentarios explicativos e indexación.

Requerimiento 5

Capacidad para resolver instancias con todas las combinaciones posibles de tipo de área y tipo de trabajador.

Requerimiento 6

Salida del Gantt con la programación de las tareas mediante la herramienta de programación R.

Requerimiento 7

Resolución del problema mediante “Lower Bound” y “Porcentaje de Ocupación Global Frontera”. Se expondrán en el [Capítulo de Resultados](#_9._Resultados_y).

Requerimiento 8

Equilibrado de la carga de trabajo, es decir, que cada trabajador tenga una carga de trabajo similar a sus compañeros. Esto evitará problemas para el Departamento de Recursos Humanos.

Requerimiento 9

Obtención en la salida de datos de la evolución (mejora) del tiempo de solución a medida que aumentan las iteraciones y la iteración concreta en la que se produce cada mejora.

Requerimiento 10

Obtención en la salida de datos del tiempo de ejecución del programa. De esta manera, se consigue analizar la eficiencia del programa frente a diferentes configuraciones de los datos de entrada y de la salida deseada.

Requerimiento 11

Obtención de los porcentajes de ocupación de cada trabajador y porcentaje de ocupación total media.

**Requerimiento 12**

Obtención de una gráfica en el que se expongan los distintos tiempos de finalización del proceso según la cantidad de trabajadores empleados

Requerimiento 13

Establecimiento de un límite de iteraciones para el programa y de diferentes criterios de parada.

Tras la exposición de los datos de entrada adicionales empleados para obtener las diferentes salidas que se desean obtener en el proyecto, y los requerimientos especificados a cumplir para que el programa ofrezca un desempeño y unos resultados adecuados, se expone el soporte teórico que se encuentra detrás de todo el desarrollo del proyecto, el estado del arte, cuya revisión ha sido imprescindible para el éxito de este trabajo de fin de grado. Además, se justifican los métodos empleados en el proyecto con el apoyo de otros trabajos similares a este encontrados en la literatura.

# 4. Estado del arte y método de resolución elegido

Una vez se han especificado los datos de entrada adicionales que se van a emplear, así como los requerimientos, se va a exponer el estado del arte y el método de resolución elegido. 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.

Por último, se justificarán los métodos de resolución elegidos, con el respaldo de otros trabajos similares encontrados en la literatura.

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

## 4.1. Problema de optimización de secuenciado

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 alguno de los sentidos) que cualquier otra solución alcanzada.

En la [programación matemática](http://www.economia48.com/spa/d/programacion-matematica/programacion-matematica.htm), en general, y en la [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 llegar a la solución óptima, que será un máximo o un mínimo, de la [función](http://www.economia48.com/spa/d/funcion/funcion.htm) [objetivo](http://www.economia48.com/spa/d/objetivo/objetivo.htm), cumpliendo las restricciones.

No obstante, la 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 obtención de la solución óptima, o porque aun pudiendo ser las técnicas exactas utilizadas, el tiempo necesario para obtener la solución del problema es muy elevado. La alternativa para estos casos, la constituyen los métodos heurísticos, que mediante diferentes mecanismos buscan una solución "suficientemente buena" en un tiempo aceptable.

Como una primera aproximación, un problema de secuenciado consta de un “Makespam”, o duración del proyecto, de la asignación de recursos para un conjunto de actividades de duración conocida y de las necesidades de recursos, que deben realizarse garantizando algunas relaciones de precedencia.

Sólo se pueden asignar recursos a una tarea a la vez. Por lo tanto, la limitación de recursos, podrá imponer relaciones de precedencia adicionales entre actividades que consumen el mismo recurso, aumentando posiblemente la duración del proyecto. Al mismo tiempo, realizar actividades simultáneamente para ahorrar tiempo usualmente resultará en mayores costos asociados a la mayor cantidad de recursos consumidos.

La información aquí expresada tiene como fuente Wikipedia, (<https://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora> 2017) y (<https://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_(matem%C3%A1tica)> 2016).

Estas consideraciones conducen a los siguientes problemas de optimización:

RCSP - Resource Constrained Scheduling Problem: Su objetivo es, con una limitada cantidad de recursos, acortar en lo posible la duración del proyecto. Este es el que se busca resolver en el proyecto. Fue definido por Brucker (Brucker 1999).

TCSP - Time Constrained Scheduling Problem: Dado un límite de tiempo para la duración del proyecto el objetivo es encontrar el secuenciado que nos proporciona un menor consumo de recursos, si los recursos se suponen disponibles en cantidades ilimitadas a un costo fijo.

## 4.2. Breve descripción del modelo en términos matemáticos

Los problemas de programación son un tipo de problemas de optimización combinatoria. Estos se definen por un espacio de solución X, que es discreta o que puede ser reducido a un conjunto discreto Y por un subconjunto de soluciones factibles

Cada solución está asociada con una función objetivo. El objetivo del problema es encontrar una posible solución de tal manera que *f*(*y*) es minimizada o maximizada.

Utilizando la definición de RCSP propuesta por Koné (Koné 2009), los dos problemas de programación son un problema de optimización combinatoria definido por una 6-tupla (W, p, A, K, B, LT), donde:

1. W es un conjunto de actividades
2. P es un vector de tiempos de procesamiento por actividad
3. A es el conjunto de restricciones temporales
4. R es el conjunto de recursos
5. *B* representa la matriz de demanda (consumo de recursos por actividad)
6. B es el vector de capacidad de recursos - para el RCSP
7. LT es el vector de “Lead Time” de capacidad para el TCSP

El objetivo es identificar un horario factible, que asigna un comienzo/terminación (*/*) para cada actividad, así como una asignación de recursos, teniendo en cuenta las limitaciones temporales y reduciendo al mínimo el plazo de ejecución total del proyecto (RCSP) o el consumo de recursos (TCSP). En el caso que nos ocupa, será el plazo mínimo de ejecución total del proyecto.

En cuanto a las limitaciones temporales, la notación más común es la “activity-on-the-node” (AoN), es decir la red de actividades y arcos, donde los nodos representan las actividades y los arcos restricciones de precedencia. También se puede incluir información sobre los tiempos de procesamiento por actividad en la representación gráfica.

Se presentan dos restricciones adicionales:

1. **Restricción “No Paralela”:** impide la ejecución de dos tareas en el mismo intervalo temporal. En el caso más estudiado en el proyecto, esta restricción no tiene relevancia.
2. **Restricción “Consecutiva”:** fuerza la programación de una tarea a continuación de otra. Complica en cierta medida la programación pues debe de existir disponibilidad de recursos para programar las dos tareas consecutivas, y, además, deben tener todos sus predecesores finalizados.

## 4.3. Métodos para resolver el RCSP

Como otros problemas de combinatoria, el RCSP puede ser resuelto utilizando varias técnicas.

Se trata de un problema NP-Hard, “Nondeterministic Polynomial”, es decir, un problema polinómico no determinista que no se puede reducir a un problema más sencillo originando un problema de complicada (“Hard”) resolución. Los casos con más de sesenta actividades son difíciles de resolver utilizando métodos exactos. Por ello, una amplia gama de métodos heurísticos y metaheurísticos se han propuesto a lo largo del tiempo. En esta apartado, se expone un resumen de algunas de las propuestas tras comentar brevemente los métodos exactos existentes.

## 4.3.1. Métodos exactos

Los métodos exactos garantizan encontrar la solución óptima, pero si el problema es complejo, el tiempo empleado en hallar y garantizar la solución deseada puede resultar no viable. El problema tratado en este proyecto fue resuelto por la compañía aeronáutica empleando la programación lineal.

Los procedimientos exactos de uso más común son los que se exponen a continuación:

1. Exploración dirigida o B&B “Branch-And-Bound”. Organiza las soluciones en conjuntos, progresivamente más pequeños y determina para cada conjunto un indicador de la calidad de las soluciones que contiene. Este indicador permite considerar qué conjuntos son los que más interesa explorar. Esta exploración consiste en sustituir el conjunto por dos o más subconjuntos. En resumen, “divide y vencerás”.
2. Programación Lineal Entera (PLE), Binaria (PLB) o Mixta (PLM). Casi la totalidad de los problemas combinatorios admiten una formulación como programas lineales enteros o binarios, y especialmente como mixtos, siendo este último el algoritmo que emplea la compañía aeronáutica para resolver el proyecto mayor en el que se enmarca este. El inconveniente de este método reside en la gran cantidad de variables que surgen en la mayoría de los problemas, y el alto tiempo de resolución.
3. Programación Dinámica (PD). En vez de enfocar el problema como la optimización de una función global, se resuelve por etapas en cada una de las cuales se puede tomar una decisión independiente de las decisiones consideradas previamente.
4. Programación dinámica acotada o “Bounded Dynamic Programming” (BDP). La estructura es la misma que en el procedimiento anterior. En este método, se conoce una cota inferior o superior de los elementos que deben integrarse para pasar de un estado a otro. Se compara el mejor valor esperado a partir del estado considerado con el de una solución heurística, cancelando los estados que no ofrecen garantías de mejora y desechándolos.

La información contenida en este apartado ha sido extraída de (<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3638/31132-1.pdf>, 2003).

## 4.3.2. Heurística y método heurístico

La heurística es la ciencia que estudia los procesos de decisión respecto a un campo de conocimiento concreto, como son las estrategias cognitivas. Su expresión en forma computacional es el algoritmo. La palabra heurística procede de la palabra griega “heuriskein” que significa encontrar, descubrir. Por heurística se entiende una estrategia, método, criterio o truco usado para hacer más sencilla y simple la solución de problemas difíciles y que en un principio no parecen abordables.

El conocimiento heurístico es un tipo especial de conocimiento empleado 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, pero de muy difícil resolución, comienzan a aparecer algoritmos capaces de ofrecer posibles soluciones que, aunque no consiguen el resultado óptimo, sí que se acercan en un tiempo de cálculo razonable, obteniéndose así una solución, lo “suficientemente buena”.

Estos algoritmos están basados en el conocimiento heurístico y por tanto se conocen como algoritmos heurísticos. Por lo general, estos algoritmos encuentran buenas soluciones, aunque a veces no hay pruebas de que la solución pueda hallarse en un tiempo razonablemente corto o incluso de que sea correcta. En ocasiones se pueden encontrar casos particulares del problema en los que la heurística obtendrá resultados muy malos o que necesiten demasiado tiempo para encontrar una solución, lo cual no es lo que se busca con la aplicación de un algoritmo de tipo heurístico.

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 capacidad para solucionar problemas reales de una forma satisfactoria, este método se fue abriendo paso, sobre todo a partir de los años 60.

El método heurístico conocido como “IDEAL”, formulado por Bransford y Stein (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. El matemático Polya (Polya 1957) también formuló un método heurístico para resolver problemas.

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

La información contenida en este apartado ha sido extraída de (http://es.slideshare.net/profjavierjuarez/metodo-heurstico-1.com 2013).

## 4.3.3. Ventajas e inconvenientes del método heurístico

Las principales ventajas y desventajas del método heurístico son:

1. Permite obtener un conjunto muy amplio de soluciones, quedándose con la mejor, siendo esta normalmente lo “suficientemente buena”, es decir, lo suficientemente cercana al óptimo
2. Si no se conoce el óptimo del problema, podría obtenerse una solución del problema demasiado alejada de un valor aceptable, siendo esto totalmente indeseable
3. Si se necesita un tiempo demasiado alto para la resolución del heurístico, se estaría violando uno de los principios fundamentales de los algoritmos heurísticos, que su solución se obtenga en un período de tiempo reducido
4. Algunos heurísticos se pueden contradecir al aplicarse al mismo problema, creando con esto, confusión
5. Las soluciones determinadas por el heurístico pueden hacer menos exhaustiva la búsqueda

La información contenida en este apartado ha sido extraída de (http://es.slideshare.net/profjavierjuarez/metodo-heurstico-1.com, 2013).

## 4.4. Heurísticos

En 1963, Kelley (Kelley 1963) publicó un primer heurístico de generación de secuenciados. Desde entonces, se han propuesto un gran número de técnicas de solución diferente. El núcleo de la mayoría de ellos es el “Schedule Generation Schemes” (SGS), es decir, sistema de generación de secuencias. En algunos casos, la generación de los “schedule” o programaciones, destaca por el uso de reglas de prioridad, dando lugar a un conjunto de heurísticos conocido como heurísticos RCSP basados en prioridad.

Los programas de generación de secuencias utilizan un enfoque paso a paso para construir un horario factible, a partir de uno parcial. Esta ampliación progresiva del horario puede hacerse siguiendo dos enfoques: SGS “activity-oriented series” donde una actividad es programada en cada paso, y SGS “time-oriented parallel” donde en cada paso, un instante de tiempo es considerado, y varias actividades pueden ser incluidas en el programa.

## 4.5. Elección del sistema de generación de programaciones

Se debe elegir uno de entre los dos posibles sistemas de generación de programaciones. En ambos casos, una vez que una actividad ha sido introducida en la secuencia solución, nunca es resecuenciada. El orden de secuenciación puede obtenerse de forma aleatoria o mediante una función de prioridad tal como el requerimiento de recursos, duración de las actividades, entre otros. Cada regla de prioridad define una secuenciación diferente. Estos son los dos tipos de sistemas de generación de programaciones expuestos por Kolisch (Kolisch 1996):

### 4.5.1. Sistema de generación de programaciones en serie:

En cada iteración una actividad es seleccionada y programada de entre el conjunto de tareas que están disponibles para programar, y una vez programada entra en el conjunto solución. El criterio para seleccionar la tarea a programar es una regla de prioridad. La tarea se programa en el instante más temprano posible según la disponibilidad de recursos. Cuando todas las actividades están programadas termina el algoritmo.

### 4.5.2. Sistema de generación de programaciones en paralelo:

Se define una vez más un conjunto de candidatos, un conjunto de actividades que pueden programarse dado que todos sus predecesores han concluido. Difiere en el sistema de generación de programaciones en serie en el hecho de que, en cada iteración, además de definirse este primer conjunto de actividades, se define a continuación un subconjunto dentro de ese conjunto de las actividades que se van a programar en función de la disponibilidad de recursos. De esta forma, en cada iteración es posible que se programen varias tareas, y no sólo una como en el caso de la generación de programaciones en serie.

Según Kolisch, (Kolisch 1996), el método de secuenciación en serie es bueno para muestras grandes y restricciones moderadas de recursos mientras que el método en paralelo es el adecuado para tamaños pequeños y grandes restricciones de recursos. De esta forma, se concluye que el método de secuenciación adecuado para el proyecto que nos ocupa será el **sistema de generación de programaciones en serie**.

## 4.6. Reglas de prioridad

Al generar horarios factibles, con cualquiera de los SGS, normalmente usamos reglas de prioridad para asignar a cada actividad un valor para que la actividad con el valor mayor (o menor) sea elegido. También se debe definir una regla adicional, para utilizar en caso de empate.

Las reglas de prioridad pueden centrarse en diferentes características de la actividad. Los principales grupos son basados en la actividad, basados en la red, las reglas basadas en el camino crítico o las basadas en los recursos. A continuación, se exponen las reglas de prioridad existentes según Brucker y Knust (Brucker y Knust 2011)

**Tipo**  **Siglas** **Regla elige actividad con el:**

Basadas en actividades SPT Tiempo de procesamiento menor

Basadas en actividades LPT Tiempo de procesamiento más largo

Basadas en la red MIS Mayor número inmediatos sucesores

Basadas en la red LIS Menor número inmediatos sucesores

Basadas en la red MTS Mayor número de sucesores

Basadas en la red LTS Menor número de sucesores

Basadas en la red GRPW Mayor rango posicional por peso

Basadas en camino crítico EST Menor tiempo temprano de comienzo

Basadas en camino crítico ECT Menor tiempo temprano de final

Basadas en camino crítico LST Mayor tiempo temprano de comienzo

Basadas en camino crítico LCT Mayor tiempo temprano de final

Basadas en camino crítico MSLK Mínima holgura

Basadas en recursos GRR Mayores requerimientos de recursos

Tabla 3: principales reglas de prioridad y su criterio de programación de tareas

Si el valor asignado a una tarea sigue siendo el mismo en todo el SGS, decimos que la regla de prioridad es estática y dinámica si es lo contrario.

El heurístico basado en prioridades es frecuentemente empleado en la práctica puesto que tienen un tiempo de funcionamiento reducido en general y son fáciles de implementar. Además, se emplean frecuentemente para calcular límites superiores o inferiores y soluciones iniciales. Este enfoque, el de heurístico basado en prioridades, es el empleado en este proyecto. A continuación, se expondrá los motivos para la elección de la regla de prioridad GRPW.

## 4.7. Elección de la regla de prioridad

Tras el análisis del problema a resolver, y el estudio de la literatura disponible, se hace patente que las mejores reglas de prioridad serán:

**GRPW Greatest Rank Position Weight:** este criterio selecciona actividades mediante la suma de la duración de la actividad y la de todos sus sucesores.

**MTS Most Total Successors:** este criterio selecciona actividades mediante la suma de todos los sucesores de la actividad

Cooper (Cooper 1976) posiciona estas dos reglas de prioridad entre las primeras del ranking que hizo con los resultados de un estudio sobre las aplicaciones del secuenciado en serie. Empleó un tamaño muestral de cien. Información extraída de un escrito de Kolisch (Kolisch 1996).

Davies y Patterson hicieron un estudio computacional de los heurísticos RCPS (Davies and Patterson 1975). Los autores comparan heurístico y soluciones óptimas de problemas tipo RCPS. Los resultados globales de 25 algoritmos, es decir, 25 reglas de prioridad, y 144 proyectos, de tamaños muestrales de 27, 51 y 103 actividades, muestran que la distancia media al óptimo para la GRPW fue del 3,3% y la distancia media de la MTS al óptimo fue 3.55%. La GPRW fue la mejor regla de prioridad en este aspecto mientras que la MTS fue la tercera. Información extraída del libro de Slowinski, (Slowinski 1989).

Hay otras reglas que parecen buenas, como CUMRED CUMulative Resource Equivalent Duration, pero su implementación parece complicada.

Por todo esto, la regla de prioridad seleccionada, es la GRPW. Por tanto, el problema que se trata en el proyecto será, el problema de secuenciado con recursos limitados o RCSP, que empleará un secuenciado en serie que utiliza una regla de prioridad, la GRPW, y la aleatorización sesgada, como criterio para decidir la tarea que se secuencia en cada iteración.

## 4.8. Metaheurísticos

Entre todos los metaheurísticos, los más comunes para la RCSP son algoritmos genéticos, búsqueda tabú, recocido simulado y colonia de hormigas.

### 4.8.1. Algoritmos genéticos

Propuesto en primer lugar por John Holland, (Holland 1995), los algoritmos genéticos (GAs) están basados en las ideas evolucionistas de la selección natural y genética. GAs está diseñado para simular procesos en un sistema natural necesarios para la evolución, específicamente aquellos que siguen los principios establecidos por Charles Robert Darwin, de la supervivencia del más fuerte o el más apto. Representan una explotación inteligente de una búsqueda al azar dentro de un definido espacio de búsqueda para resolver un problema.

Estos algoritmos consideran un conjunto de programas factibles, o población. A partir de éstos, nuevas soluciones se calculan por el apareamiento de dos ya existentes, lo que constituye un cruce, o por modificar uno ya existente, lo que, siguiendo las analogías con la Teoría de la Evolución, representa una mutación. Una vez que se producen las nuevas soluciones, la mejor de las soluciones es elegida según el valor de la función objetivo. Los más aptos, es decir, las mejores soluciones sobreviven, convirtiéndose en la próxima generación y el resto mueren, se eliminan.

Ha sido uno de los metaheurísticos más comúnmente utilizados para resolver el problema RCSP. Dos ejemplos son los propuestos por Hartmann (Harmann 1998) y, más recientemente, un mejor algoritmo por Valls (Valls 2003).

### 4.8.2. Búsqueda tabú

El concepto básico de búsqueda tabú fue descrito por Fred W. Glover, (Glover 1989). Se trata de un método de investigación que evalúa todas las soluciones de un área y elige la mejor opción. Este método tendría el riesgo de volverse cíclico, volviendo a la situación previa. Para evitar este problema, una lista de tabú se configura como una forma de memoria para el proceso de búsqueda. Esta lista puede prevalecer solamente si el área correspondiente dará lugar a una nueva solución global mejor.

Artigues (Artigues 2003), Klein (Klein 2000) y Nonobe e Ibaraki (Nonobe e Ibaraki 2002) han propuesto algunos de los más recientes algoritmos de búsqueda tabú para la RCSP.

### 4.8.3. Optimización de Colonia de Hormigas

La “Ant Colony Optimization” (ACO) toma inspiración de la conducta de forrajeo de algunas especies de hormigas, (Marco Dorigo 1996). Estas hormigas depositan feromonas en el suelo para marcar algún camino favorable que debe ser seguido por otros miembros de la colonia. La Optimización de Colonia de hormigas explota un mecanismo similar para resolver problemas de optimización.

En el caso de RCSP, cada solución está representada por una lista de actividades, que describe el orden en que las actividades se han incluido en la solución durante el SGS. El valor de feromona en este caso está relacionado con lo prometedor que parece poner la actividad *w* en la programación, teniendo en cuenta el valor objetivo de la función de las anteriores que incluyeron esa opción.

Merkle (Merkle 2006) presentó el primer ACO para un RCSP.

## 4.9. Problemas similares al que trata el proyecto encontrados en la literatura

Se exponen a continuación algunos problemas similares al tratado en el proyecto encontrados en la literatura, sobre todo aquellos que hacen referencia al secuenciado de tareas y a la industria aeronáutica:

1. Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: the case of the aerospace industry (Heike et al. 1999). En este artículo se investigan nuevas alternativas para un modelo mixto de ensamblado para pequeñas plantas de producción en la industria aeronáutica. Se busca flexibilidad y eficiencia en el uso de los recursos. Se desarrollan cuatro modelos para evaluar el tiempo de ciclo y las alternativas para la asignación de trabajadores con respecto al trabajo y al coste de almacenamiento de inventario
2. Concurrent design and realization of aircraft production flow lines- process challenges and successful design methods (Frankenberger 2007). En este documento se exponen los principales problemas que puede afrontar una línea de producción en el marco de la industria aeronáutica y cómo pueden ser sistemáticamente resueltos. Se consigue una reducción del coste unitario, del tiempo de finalización del proyecto, así como mejoras en la calidad de los productos
3. Application of lean manufacturing tecnique for the design of the aircraft assembly line (Gastelum 2002). Este escrito es una tesis de máster realizada para el Massachusetts Institute of Technology (MIT). En él se trata la aplicación de la producción ajustada a una línea de ensamblado de una planta de producción de componentes aeronáuticos.

En este Capítulo, se realiza la exposición de la teoría sobre la que se sustenta el proyecto, en la que se han expuesto los Métodos Exactos y No Exactos, profundizando en el problema que nos ocupa, el RCSP, y los distintos métodos posibles para resolverlo, los motivos de la elección del método de resolución sustentándose en artículos encontrados en la literatura y una exposición de algunos problemas similares ya tratados. En el próximo Capítulo se expone el pseudocódigo, primer paso en la aplicación del diseño que se ha hecho hasta el momento del heurístico que se va a desarrollar en este Trabajo de Fin de Grado. Además, se hablará del modo en el que el software estadístico R trata los datos de salida del programa implementado en C para obtener el diagrama de Gantt.

# 5. Descripción del modelo

En el anterior Capítulo se expuso el estado del arte, el método de resolución elegido y algunos trabajos similares a los que trata este proyecto encontrados en la literatura. Para que el software pueda llevar a cabo los correspondientes cálculos, los requerimientos definidos en el [Capítulo 3](#_3.2._Requerimientos) han de ser traducidos a código.

A lo largo de este Capítulo, se expondrá el pseudocódigo, que se encuentra numerado. De esta forma será posible hacer referencia a líneas o instrucciones del pseudocódigo en la explicación del pseudocódigo.

## 5.1. Pseudocódigo

1. **DO** recogida de los datos de entrada para su posterior almacenado en las variables.

2. **WHILE** iteraciones menor que las soluciones deseadas (comienzo parte principal):

3. **WHILE** i menor que número de tareas de la instancia:

4. **DO** escoger una actividad del set empleando la regla de prioridad GRPW.

5. **DO** calcular el menor tiempo en el que la actividad puede ser programada respetando restricciones y limitaciones de recursos.

6. **DO** programar la actividad en el intervalo y actualizar los recursos, almacenando el resultado en la solución auxiliar.

7. **IF** finalización de la actividad programada es mayor que el tiempo de finalización del proyecto alcanzado en iteraciones previas.

8**. IF** se han realizado más de un número determinado de iteraciones sin una mejora del tiempo de realización del proyecto.

9. **DO** saltar a la instrucción 16 finalizando la parte principal.

10. **ELSE**

11. **DO** reiniciar solución auxiliar y recursos y saltar a la instrucción 2.

12. **ELSE**

13.  **DO** actualizar set de actividades a programar.

14. **ENDWHILE.**

15. **DO** almacenar datos de solución auxiliar en solución temporal.

16. **ENDWHILE.** Finaliza la parte principal.

17. **DO** Almacenar solución temporal en solución final, que se vuelca en un “.txt”.

18. **DO** Lectura del fichero “.txt” en R

19. **DO** Dibujado del diagrama de Gantt, mediante el código implementado en R

## 5.2. Explicación del pseudocódigo

Como ya se explicó en el [Capítulo 2](#_2.3._Caracterización_de_1) en el apartado de Caracterización de las instancias, cada instancia está comprendida por tareas, las cuales tienen diferentes especificaciones que se encuentran en un fichero “.txt” de manera estandarizada, es decir, la disposición de estos datos es siempre la misma como se puede apreciar en la Ilustración 4.

1

2

3

4

6

7

8

9

10

11

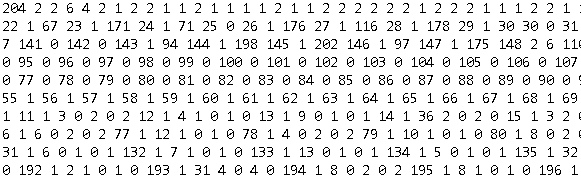


Ilustración 4: datos de entrada correspondientes a la instancia recogidos en un “.txt”.

Cada número en la Ilustración 4 hace referencia a un tipo de dato distinto:

1. Numero de tareas
2. Número de áreas
3. Número de trabajadores
4. Capacidad de las áreas
5. Capacidad de trabajadores: especificada en el código o introducida por teclado
6. Mínimo y máximo de trabajadores
7. Precedencias
8. Restricción “No Paralela
9. Restricción “Consecutiva
10. Número de modos
11. Modos

Por tanto, la disposición de datos es siempre igual para todas las instancias por lo que resulta muy sencillo almacenarlas en variables para su posterior uso en el programa implementado en C. Esto se hace de tal forma que el código es capaz de leer cualquier instancia que tenga esta disposición de datos, cumpliéndose así el Requerimiento 1, que ponía de manifiesto la necesidad de que el código fuera capaz de leer cualquier instancia proporcionada por la compañía aeronáutica.

Se incluyen las librerías necesarias, se definen constantes y se definen las variables que se emplean en el programa para después inicializarlas al valor deseado. Con esto se completa la instrucción de la línea 1 del pseudocódigo, y se continua a la instrucción de la línea 2.

El bucle “while” que comienza en la instrucción 2 se ejecuta desde la iteración cero hasta que el número de iteraciones alcance la cantidad de soluciones que queremos obtener antes de que el código implementado en C finalice su parte principal. Este bucle contiene la mayor parte del código, comprendiendo desde la línea 2 hasta la 16 del pseudocódigo.

En la línea 3 da comienzo un bucle “while” que se ejecuta desde el valor de la variable auxiliar “i” igual a cero hasta alcanzar el número total de tareas que tiene la instancia. Dicha variable auxiliar es un índice que representa la posición en la que es programada una tarea, por ejemplo, la tarea 13 se ha programado en la sexta iteración (valor de “i” igual a 6) y la tarea 85 se ha programado en la decimotercera (valor de “i” igual a 13). Este bucle comprende desde la instrucción 3 hasta la 14.

En la línea 4 se elige la tarea que se secuencia. El set de actividades que se pueden programar es . El set representa las tareas que se pueden programar en la iteración cero, es decir, para un valor de “i” igual a cero. Estas tareas son las que no tienen predecesor. Se escoge una actividad del set. Esto se realiza usando una regla de prioridad. La regla de prioridad GRPW asigna un peso a cada actividad de cara a decidir la probabilidad con la que ésta se puede programar. Esto se lleva a cabo para poder realizar la aleatorización sesgada, es decir, cuanto mayor es el peso (o menor, para ciertas reglas de prioridad), mayor es la probabilidad de que la actividad sea escogida para su programación.

En la instrucción 5 se calcula el primer intervalo temporal para el que la cantidad necesaria de recursos para hacer la actividad que se ha decidido secuenciar está disponible (Trabajadores Mecánicos o Estructurales, las Áreas 1 ó 2), y para el que las restricciones, se cumplen (la de precedencias y la restricción de tareas consecutivas, es decir, la de lapso de tiempo cero). Para que se cumpla la restricción de tareas consecutivas, las dos tareas deben cumplir las restricciones y disponer de recursos suficientes en el intervalo temporal que conforman ambas, pues sus intervalos temporales se solapan ya que cuando finaliza una comienza la otra inmediatamente después. Esto se debe a que el retardo especificado es cero para todas las restricciones consecutivas.

Una vez calculado el intervalo temporal más temprano factible en el que se puede programar la tarea (o tareas si hay restricción consecutiva), se continúa con la línea 6. Se programa la actividad en el intervalo calculado y se actualizan los recursos mediante la disminución de los recursos empleados por la actividad en dicho intervalo. Se almacenan los resultados obtenidos en la solución auxiliar.

La instrucción 7 da comienzo a un “if-else” que termina en la línea 13. Contiene el criterio de parada y un filtro que permite mejorar el tiempo de ejecución de manera considerable. Cuando el tiempo de finalización de la tarea programada en esta iteración “i” es mayor que el tiempo de finalización del proyecto almacenado en una solución temporal hallada en alguna iteración anterior del bucle “while” que representa la parte principal, se cumple la instrucción 7. Esto provoca que el programa pase a la instrucción 8, que es un “if-else”, aninado en el “if-else” mayor, que termina en la línea 11. De lo contrario, el programa continuaría con la instrucción 12, el “else” del “if-else” mayor.

El “if” de este “if-else” aninado (menor) representa el criterio de parada, que se activa si se supera un número determinado de iteraciones de la parte principal del programa sin que se produzca una mejora en el tiempo de realización del proyecto. De cumplirse esta instrucción 8, se pasa a la instrucción 9, que provoca la salida de la parte principal con el salto hasta la línea 16.

De no cumplirse la instrucción 8, se activa la 10, que es el “else” del “if-else” menor, y se ejecuta la instrucción 11 que nos lleva a la instrucción 2, pasando a la siguiente iteración de la parte principal y reiniciando por tanto las variables de recursos y las de la solución auxiliar.

De no cumplirse el “if” del “if-else” mayor, se aplica el “else” que es la instrucción 12 y se realiza la instrucción 13. Se elimina la actividad que acaba de ser secuenciada, del conjunto de tareas a programar . Se añade al siguiente set de actividades todos los sucesores de la actividad programada cuyos predecesores ya han sido programados en iteraciones previas. Se estipula además el comienzo temprano de estas nuevas tareas que se pueden programar, coincidiendo éste con el final más tardío de entre todas sus tareas predecesoras. Se vuelve a la instrucción 3 continuando el “while” que comprende las líneas de la 3 a la 14, que se ejecuta hasta que todas las tareas han sido programadas o hasta que se activa la instrucción 9, que es el criterio de parada.

Después de completar el bucle “while” que comprende desde la instrucción 3 hasta la 14, es decir, cuando todas las tareas se han programado, se almacenan los datos de la solución auxiliar en la solución temporal como se especifica en la línea 15.

La parte principal termina con la línea 16. Se ha obtenido la cantidad de soluciones deseadas o bien se ha activado el criterio de parada que es la línea 9. Al llegar a la línea 16, se tiene la mejor solución de entre todas las que se han hallado, siendo la función objetivo a optimizar el tiempo de realización del proyecto, que debe ser lo más pequeño posible.

En la línea 17, se almacena la solución temporal en la solución final, y esta se vuelca en un fichero “.txt”, dando por finalizado el programa implementado en C.

Las líneas 18 y 19, corresponden al final del pseudocódigo y a la parte correspondiente al programa implementado en R. La línea 18, constituye la recogida de datos. La forma en la que se hace este paso se explica detalladamente en el [Capítulo 7](#_7.2._Entrada_de). La idea aplicada es la misma que la descrito previamente para la lectura de los datos de entrada del programa implementado en C, ya que la salida de datos del programa realizado en C está también dispuesta siempre de la misma forma y esta es precisamente la entrada del programa implementado en R. Esto permite una fácil lectura y almacenado de los datos en el programa implementado en R.

Por último, se ejecuta la instrucción 19. Se realiza así el dibujado de la solución final en forma de diagrama de Gantt, quedando un resultado muy visual y entendible. Así, se cumple el Requerimiento 6, que pide que el resultado se exponga en un diagrama de Gantt. Para ello se ha empleado el paquete “ggplot2”. Con esto concluye el pseudocódigo.

En estos cinco primeros Capítulos, se han expuesto las características del problema y de las instancias, así como la forma en la que se resolverá dicho problema y el software a emplear, los lenguajes de programación R y C. Se ha hecho un repaso del marco teórico sobre el que se asienta el problema además de una revisión de la literatura. A continuación, se ha decidido el empleo de un heurístico que programa siguiendo un esquema de secuenciación en serie con regla de prioridad GRPW y aleatorización sesgada según el peso asignado por dicha regla de prioridad. Por último, se ha especificado el pseudocódigo que tendrá el programa.

Una vez completado el diseño inicial del programa, se entra en una nueva fase del proyecto, la de implementación del modelo en C, cumpliendo todas estas directrices y siguiendo los requerimientos del cliente para obtener los resultados deseados.

En los próximos Capítulos, se tratará la implementación del modelo, los resultados y su análisis, las conclusiones y las mejoras futuras, con lo que se dará por concluida la resolución de este problema de secuenciado de tareas con recursos limitados, enfocado a la industria aeronáutica.

# 6. Implementación del programa en C

Tras completar la fase de diseño del programa, comienza la fase de programación y obtención de resultados. Se hablará a continuación de las características del programa desarrollado en C. Para su desarrollo fue fundamental el seguimiento del pseudocódigo definido en el [Capítulo 5](#_5._Descripción_del).

## 6.1. Introducción al modelo

En este apartado se hablará de las principales subdivisiones en las que podemos dividir el programa implementado en C:

1. Declaración e inicialización de variables. Definición de constantes
2. Apertura del fichero de datos de entrada y almacenamiento en las variables correspondientes
3. Cálculos previos
4. Programa principal
5. Resultados y salida de datos

Cada una de estas partes del programa será explicada a continuación, incluyendo imágenes de partes relevantes del programa. Se dará especial importancia a las partes concretas del programa que tienen relación con el cumplimiento de alguno de los requerimientos especificados por el cliente.

A lo largo de todo el programa, se ha hecho especial hincapié en el cumplimiento del Requerimiento 4 “Claridad y simplicidad en el código desarrollado, uso de comentarios explicativos e indexación”. Este requerimiento resume las características básicas que debe tener cualquier programa para que su desarrollo sea ordenado, simple, y fácil de entender por otros programadores que no hayan visto previamente el código.

Los comentarios se encuentran en azul, y no tienen efecto en el código, ya que el compilador ignora todas las instrucciones situadas entre estos caracteres “/\* \*/”, que son los empleados para escribir comentarios. Su función es meramente informativa, explicando el código para hacerlo más entendible a otros programadores que no estén familiarizados con el programa o el problema que resuelve el programa.

## 6.2. Declaración e inicialización de variables. Definición de constantes.

Para el correcto desarrollo del programa, de 2253 líneas de longitud, ha sido necesario el empleo de una gran cantidad de variables. Gran parte de ellas corresponden a variables asociadas a recursos y a almacenamiento de resultados, otras almacenan las restricciones, y las restantes se tratan de índices, variables auxiliares, y otros datos de entrada adicionales. Se ha definido “Time”, que hace referencia al espacio temporal en el que se ejecutarán las tareas y en el que, por tanto, en un primer momento existirán todos los recursos para después irse agotando progresivamente a medida que las tareas se van programando.

Para este programa se han empleado un total de 160 variables, muchas de ellas de tipo vectorial, teniendo como argumento la mayoría de ellas la constante “Time”, es decir, adquieren diferentes valores a lo largo del espacio temporal. Esto es fundamental en el programa, por ejemplo, a la hora de comprobar la disponibilidad de recursos en un intervalo temporal para que de esta forma pueda programarse una tarea o para descontar recursos correspondientes a los consumidos por la tarea programada en el intervalo temporal en el que se ejecuta, entre otros.

En la Ilustración 5 se adjuntan las librerías empleadas, además de las estándar “stdio.h”, “stdlib.h” y “string.h”, se emplean “time.h” y “math.h”, por motivos que se justificarán a posteriori ya que su utilidad queda patente en otras etapas del programa. También se pueden ver las constantes definidas y una parte de las variables utilizadas. El valor de la constante “Time” es 1500, suficiente para que todas las tareas se hayan programado en todos los posibles casos del problema estudiados en este proyecto.

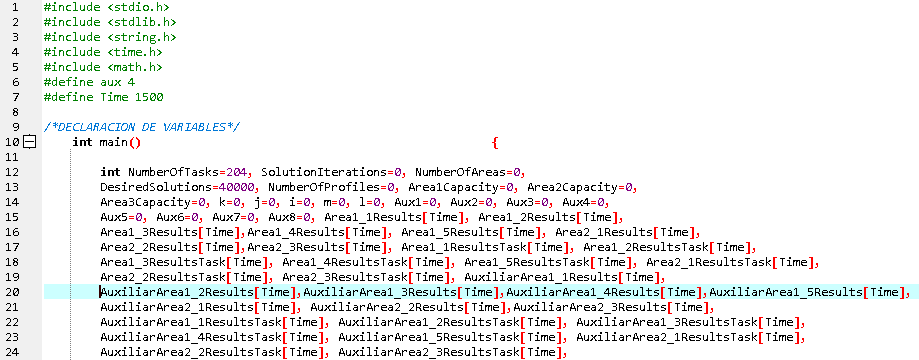


Ilustración 5: librerías, constantes y parte de las variables.

En algunos casos es necesario el empleo de variables de tipo matricial. La mayoría de las variables son de tipo entero, pero también hay algunas de tipo “float”, que almacenan valores de punto flotante de 32 bits. Estas variables “float”, que se pueden ver en la Ilustración 6, corresponden a variables para almacenar tiempo de ejecución y porcentajes de ocupación, ambas variables correspondientes a un tipo de dato real.

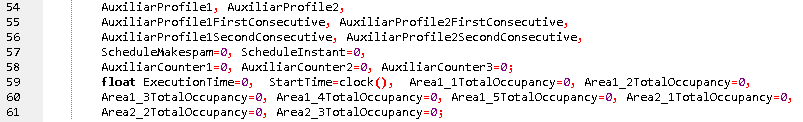


Ilustración 6: variables de tipo de dato real.

La variable de tipo “float” “StartTime”, almacena el valor del reloj del ordenador al inicio de la ejecución del programa, pues está igualada a “clock()”, función en C que corresponde al valor del reloj del ordenador. Para poder emplear esta función, es necesaria la librería “time.h”, y este es el motivo de su inclusión al principio del código antes de la función principal del programa “int main()”.

En la variable “ExecutionTime”, definida en la línea 59, se almacena la diferencia temporal entre la finalización del programa, y el instante de comienzo “StartTime”. Esto se hace mediante la resta del valor reloj de ordenador al final del programa menos el “StartTime”, en la línea 2249, correspondiente a la parte final del programa, para después sacarlo por pantalla, como se puede comprobar en la Ilustración 7. Será necesario dividir entre mil el resultado pues la función “clock()” devuelve el valor del reloj del ordenador en milisegundos.

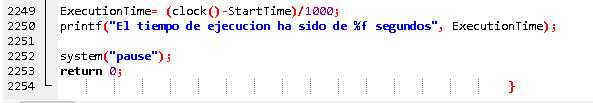


Ilustración 7: obtención del tiempo de ejecución del programa

De esta forma se obtendrá el tiempo de ejecución en segundos y se dará por cumplido el Requerimiento 10 “Obtención en la salida de datos del tiempo de ejecución del programa”. De esta manera, se consigue analizar la eficiencia del programa frente a diferentes configuraciones de los datos de entrada y de la salida deseada.

Tras la definición de las variables, se inician a cero todas las variables del programa o a su valor inicial correspondiente. Esta es una práctica muy útil para evitar posibles errores en todo el programa. A continuación, se abre el fichero con los datos de entrada y se almacenan en las variables correspondientes.

## 6.3. Apertura del fichero de datos de entrada y almacenamiento en las variables correspondientes

Como ya se vio en el [Apartado 2.3](#_2.3._Caracterización_de_1)., las especificaciones de las instancias están contenidas en un fichero de formato “.txt” proporcionado por una compañía aeronáutica. Basta abrir este fichero para después proceder al escaneado de los datos. Este fichero, como ya se vio, siempre tiene una misma disposición de los datos. Por ejemplo, en primer lugar se encuentra el número de tareas de la instancia, que se almacena en la variable “NumberOfTasks”, en segundo lugar, se encuentra el número de áreas, que se almacena en “NumberOfAreas” y así sucesivamente.

En la Ilustración 8, se recoge la apertura del fichero que contiene los datos de entrada y el escaneo de las primeras variables.

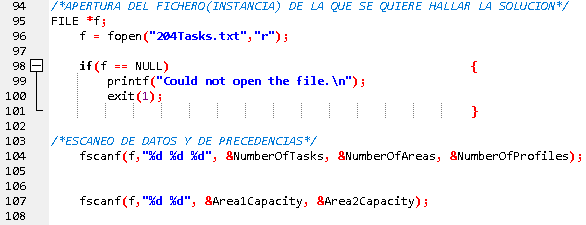


Ilustración 8: apertura de fichero de datos de entrada y escaneo de las primeras variables

Para el desarrollo de esta sección del código se ha tenido en cuenta el Requerimiento 1 “Implementar un programa que sirva para resolver el problema que nos ocupa en diferentes casos...”. De esta forma, la finalización de muchos de los bucles de esta parte del código que escanea la entrada viene determinada por “NumberOfTasks” como se puede apreciar en la Ilustración 9, consiguiéndose así almacenar todos los datos de entrada de la forma adecuada. Por ello este código es válido para la recogida de los datos de entrada de todos los posibles casos del problema proporcionados por el cliente. A continuación, se tratarán los cálculos previos.

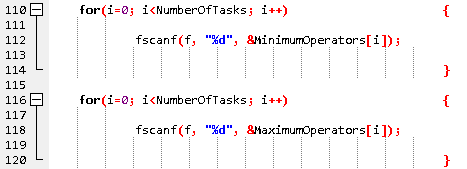


Ilustración 9: captura de los datos de entrada

## 6.4. Cálculos previos

Necesarios antes de abordar el programa principal, los cálculos previos a realizar serán:

1. Obtención del conjunto inicial de tareas a secuenciar.
2. Obtención de los pesos de cada tarea

### 6.4.1. Obtención del conjunto inicial de tareas a secuenciar

El conjunto inicial de tareas serán las tareas que se podrán programar en la iteración cero, es decir, en el instante inicial, cuando aún están disponibles todos los recursos pues no hay ninguna tarea programada todavía. Este será el primer conjunto de tareas que se pueden secuenciar en el programa. El modo de hallarlas es sencillo, bastará encontrar aquellas tareas que no tienen ningún predecesor, y que, por tanto, serán las tareas iniciales. Para ello, se hará uso de las restricciones de precedencia, de tal forma que, si una tarea en concreto no es sucesora de ninguna otra, esto significa que dicha tarea no tiene predecesores, y, por tanto, pertenecerá al conjunto inicial de tareas.

### 6.4.2. Obtención de los pesos de cada tarea

La regla de prioridad seleccionada, GRPW, asigna un peso a cada tarea que se corresponde con la suma de su duración y la de todos sus sucesores. Este cálculo previo resulta más complicado que el anterior. Se hace uso tanto de las restricciones de precedencia como de la duración de las tareas. El método para hallar el peso de cada tarea es sumar su duración y la de todos sus sucesores, pero sin que ninguno de ellos se repita, que es donde reside la mayor dificultad de esta parte del código.

Una vez obtenidos todos los sucesores de la tarea en cuestión, se suman la duración de la tarea y la de todas sus sucesoras para obtener por fin el peso que se almacena en la variable “GRPW[]” como se puede comprobar en la Ilustración 10. “GRPWSuccessors[][]” es la variable en la que se han almacenado todos los sucesores mientras que la variable “Duration[][0]” corresponde a la duración de las tareas.

El bucle no se termina hasta que se han sumado las duraciones de todos los sucesores. Este fin se produce cuando la posición “m” contiene el valor “NumberOfTasks+1”, pues significa que el vector en el que se encontraban las tareas sucesoras ha llegado a una posición, en la que el valor que contiene no se corresponde con ninguna tarea pues existen tareas desde la 0 hasta “NumberOfTasks”. En las posiciones previas a ésta, se encontraban todos los sucesores de la tarea en cuestión. La variable “i” coincide con la tarea de la que se quiere hallar su peso, mientras que la variable “m” responde a las posiciones en las que se encuentran sus sucesores.

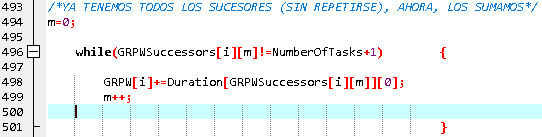


Ilustración 10: obtención del peso de cada tarea

A continuación, se tratará la parte principal del programa. Esta parte se ha desarrollado según el pseudocódigo recogido en el Capítulo 5. El código tratado hasta aquí, se ejecuta una sola vez.

## 6.5. Programa principal

Esta parte del programa se ejecuta el número de veces que especifiquemos, o bien hasta que el criterio de parada fuerce su final. En cada iteración el programa busca mejorar el tiempo de finalización del proyecto fijados unos recursos. De esta forma, si en una cierta iteración se obtiene una solución mejor a la que teníamos almacenada, la solución obtenida en esta iteración se almacena en las variables de salida. Cuando la parte principal del programa llega a su fin, se obtiene la solución final, que se vuelca en un fichero “.txt” para su tratado posterior en R. Como se puede comprobar en la Ilustración 11, al comienzo de cada una de estas iteraciones es necesario reinicializar ciertas variables, la mayoría son variables asociadas a recursos y resultados.

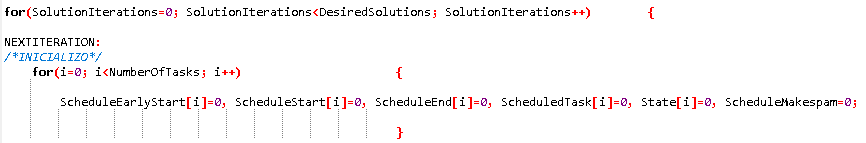


Ilustración 11: comienzo del programa principal

En ciertos puntos del programa, se define una etiqueta de manera que en caso de que la solución que se esté calculando ya sea peor que la mejor almacenada, se termina esa iteración y el programa vuelve al inicio de la parte principal gracias a la etiqueta “NEXTITERATION:”. Este simple detalle mejora en gran medida el desempeño del programa. Esta parte del programa se puede subdividir en:

1. Inicialización de recursos y variables de salida auxiliares
2. Determinación de la tarea a programar
3. Secuenciación de dicha tarea cuando sea factible
4. Obtención del conjunto de tareas que se pueden secuenciar

Estas cuatro etapas se ejecutarán hasta que ocurra una de estas tres posibilidades:

1. Se han programado todas las tareas
2. Activación del criterio de parada
3. Solución peor a la ya obtenida previamente

### 6.5.1. Inicialización de recursos y variables de salida auxiliares

Dentro del programa principal hay un bucle que no termina hasta que se han programado todas las tareas, salvo en los casos en el que en esta iteración la solución que se va a obtener sea peor, por ejemplo, en el caso de que una tarea se haya programado en un instante posterior al mejor tiempo de finalización del proyecto hallado en una iteración previa. También puede terminarse el bucle y además finalizar el programa principal en el caso de que se active el criterio de parada, como se puede comprobar en la Ilustración 12. Al inicio de este bucle, se inicializan las variables de recursos y las variables de salida auxiliares. Si en una determinada iteración se consigue mejorar la solución, las variables de salida auxiliares son almacenadas en las variables de salida.

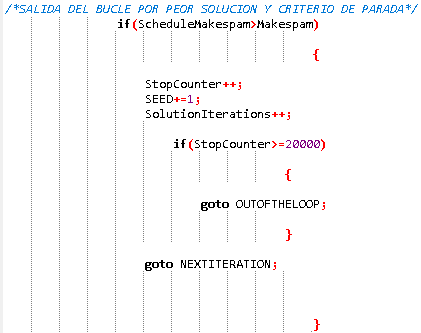


Ilustración 12: salida del bucle y criterio de parada.

La salida del bucle se produce cuando “ScheduleMakespam”, que es el tiempo de finalización del proyecto hasta el momento, es decir, el final más tardío de entre todas las tareas programadas hasta ese instante, es mayor que “Makespam”, que es el tiempo de finalización del proyecto más bajo obtenido en las iteraciones previas y cuya correspondiente solución está almacenada en las variables de salida. El abandono del bucle podría producirse tras el secuenciado de 150 tareas, para una instancia de 200 tareas, por ejemplo.

El criterio de parada, en este caso, está definido para que una vez encontrada una solución con un cierto tiempo de finalización, si en 2000 iteraciones no se consigue un tiempo mejor (más bajo), se dé por finalizada la parte principal del programa. Como se puede comprobar en la Ilustración 12, cada vez que se produce una salida del bucle “StopCounter”, se incrementa una unidad. Cuando esta variable llega a un valor de 2000 se activa el criterio de parada y la etiqueta “goto OUTOFTHELOOP;” lleva al programa fuera de la parte principal, no volviendo esta parte a ejecutarse en ningún momento, llegando así a la parte de Resultados y salida de datos, que se verá a posteriori.

El establecimiento de un criterio de parada viene especificado por el Requerimiento 13, así como la limitación de las iteraciones que puede realizar la parte principal del programa.

### 6.5.2. Determinación de la tarea a programar

Como ya se vio en apartados anteriores, el criterio para la decisión de programar una tarea u otra es la regla de prioridad “GRPW”, de tal manera que a cada tarea se le asigna un peso, ya calculado en la parte de Cálculos previos (ver [Apartado 6.4.2.](#_6.4.2._Obtención_de)). De esta forma se da cumplimiento al Requerimiento 2. A mayor peso, mayor probabilidad de que una tarea sea programada, sin embargo, también es posible que la tarea de menor peso se programe, por ejemplo. Este es el objetivo de la aleatorización sesgada, consiguiéndose así una elevada variabilidad en las soluciones obtenidas, e incrementado las posibilidades de mejora de la solución. La aplicación de la aleatorización sesgada, lleva al cumplimiento del Requerimiento 3.

De esta forma, se elige la tarea a programar entre todas las que pueden secuenciarse. Para aplicar la aleatorización sesgada, se emplea un número pseudoaleatorio, que en la práctica se puede considerar aleatorio, generado gracias a la instrucción “srand”, que necesita de la librería “math.h” para funcionar. La variable “SEED”, será el valor usado para inicializar este número aleatorio, que es empleado para seleccionar la tarea que se secuenciará. De esta forma y como se puede comprobar en la Ilustración 13, se obtiene la semilla que después empleará la instrucción “rand()%” para conseguir el número que definirá la tarea que se programa. La variable “SEED” varía con cada iteración, de manera que así se asegura la variabilidad de la semilla, y, por tanto, de las soluciones obtenidas.



Ilustración 13: inicialización de la semilla y obtención del número aleatorio que se usará para seleccionar la tarea a programar

### 6.5.3. Secuenciación de dicha tarea cuando sea factible

Una vez seleccionada la tarea a programar de entre todas las tareas que es posible secuenciar, ésta se secuencia en el primer intervalo en el que sea factible, es decir, en el primer intervalo temporal que cuente con los recursos suficientes para ejecutar dicha tarea, y que, además, cumpla todas las restricciones. En el caso de tener dicha tarea una restricción de tipo consecutiva, se fuerza a que su tarea consecutiva se programe inmediatamente después a ella. De esta forma se programan las dos (o a veces tres) tareas de manera consecutiva cumpliendo tanto restricciones como disponibilidad de recursos.

Una vez se ha programado la tarea en el primer intervalo factible, se descuentan los recursos. Este proceso se repite hasta que se programan todas las tareas, se activa el criterio de parada, o ya se conoce que la solución que se va a obtener es peor que la mejor conseguida hasta entonces. A continuación, se decide que tareas entran en el conjunto de tareas que se pueden programar.

### 6.5.4. Obtención de las tareas que se pueden secuenciar

Una vez programada la tarea, se decide cuáles de sus sucesores entran en el conjunto de tareas que se pueden secuenciar. Para ello, dichos sucesores deben tener todos sus predecesores ya completados. Para todas las tareas que entran en el conjunto de tareas que son secuenciables, se define el comienzo más temprano que pueden tener, añadiendo así una restricción adicional. Este comienzo será el final más tardío de entre todos sus predecesores. Esto evita que una tarea se programe en un intervalo temporal en el que alguno de sus predecesores aún no ha finalizado. La tarea programada finalmente entra en el conjunto solución, de tal forma que no es posible su reprogramación. A continuación, y tras terminar la parte principal, se llega a la parte de Resultados y salida de datos.

## 6.6. Resultado y salida de datos

Tras obtener la mejor solución de entra todas las halladas, ésta se imprime por pantalla y se procede a la obtención de la salida. Los datos de salida deseados son:

1. Tiempo de ejecución
2. Porcentaje de ocupación de trabajadores (dando cumplimiento al Requerimiento 12)
3. Tiempo de finalización obtenido en cada iteración en la que se produce mejora de la solución (se cumple así el requerimiento 10)
4. Orden de programación de las tareas, con su comienzo y su finalización

En el Capítulo de Resultados se hablará más extensamente de todas las posibilidades de salida de datos que se tratan en el proyecto. Cabe añadir que el porcentaje de ocupación de los trabajadores se equilibra de tal manera que así se cumple el Requerimiento 8.

Por último, y para dar por finalizado el programa, se vuelcan los datos de la salida en formato “.txt”, para su posterior tratamiento mediante el software estadístico R. Tras comentar de una manera extensa el funcionamiento del programa implementado en C, se hablará a continuación del programa implementado en R para el tratamiento de los datos. Las principales etapas del programa implementado en C son:

1. Declaración e inicialización de variables. Definición de constantes
2. Apertura del fichero de datos de entrada y almacenamiento de variables
3. Cálculos previos
4. Programa principal
5. Resultado y salida de datos

# 7. Implementación del programa en R

Tras la ejecución del programa en C y la obtención de la salida, se procede al tratamiento de los datos con el software estadístico R. El tratamiento de la salida se hace también mediante Excel, en el [Capítulo 8](#_8._Experimentos_desarrollados) se especificará qué datos se tratan con Excel y cuáles con R, así como todos los experimentos desarrollados.

En R se obtendrá el Gantt que indica a cada trabajador el comienzo y la finalización de cada tarea que debe realizar. En el programa implementado en C se hizo un equilibrado de la carga de trabajo para cada empleado de manera que se evitan problemas para el departamento de Recursos Humanos.

## 7.1. Introducción

Tras el aprendizaje de las funciones más básicas de R, se busca un paquete que implemente las funciones necesarias para la representación gráfica de este Gantt. El paquete más adecuado para este cometido, resulta ser “ggplot2” que incluye herramientas para representar el Gantt de forma satisfactoria. El resultado obtenido se puede ver en la Ilustración 14.

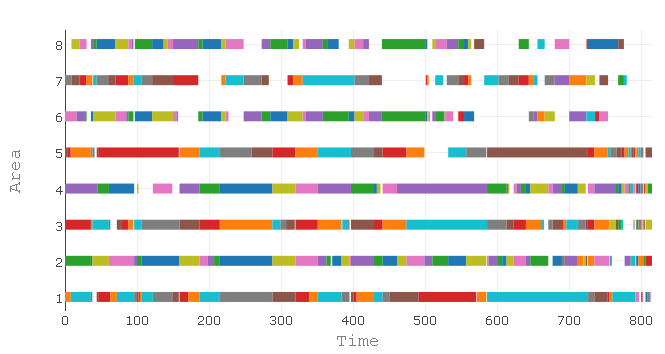


Ilustración 14: salida del programa implementado en R

Esta salida se usará a modo de ejemplo para facilitar la explicación del programa implementado en R. En el eje de las ordenadas se representa el trabajador, siendo en este caso los 1, 2, 3, 4 y 5 los correspondientes al tipo Mecánico y los tres siguientes corresponden al tipo estructural. De una manera visual se puede comprobar que las cargas de trabajo se encuentran equilibradas para trabajadores del mismo tipo, por mera observación de las franjas que no tienen color, que corresponden a intervalos de tiempo en los que el trabajador está ocioso. El eje de las abscisas es el eje que representa el tiempo. En este caso el proyecto finaliza en el instante 815.

## 7.2. Entrada de datos en R

Como ya se ha comentado, el programa implementado en C tiene como salida un fichero “.txt” que debe ser leído por el código desarrollado en R. El método empleado para hacerlo se explica a continuación.

La forma de realizar la lectura en R es sencilla, mediante el comando “df$”. Como se puede ver en la Ilustración 15 se realiza la apertura de la librería y la apertura del fichero “.txt” a través de su ruta, para después mediante un bucle “for” leer todos los datos como se puede ver en la Ilustración 15

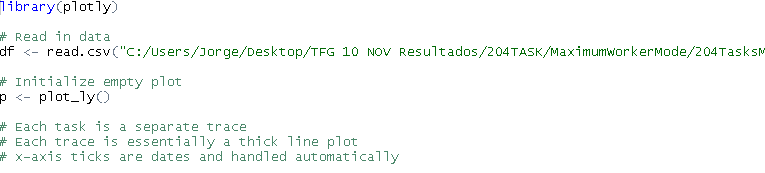


Ilustración 15: comienzo del código implementado en R

.

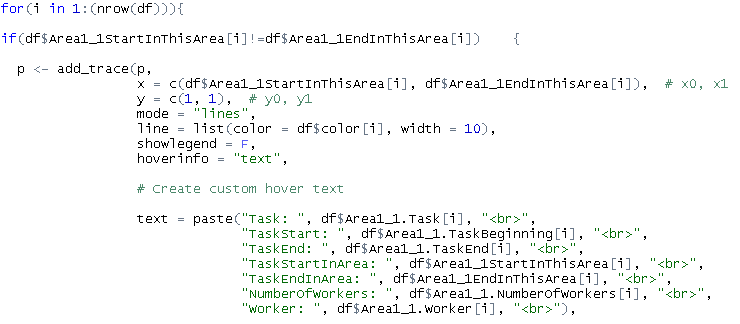


Ilustración 16: código para leer los datos del primer trabajador

La Ilustración 16 servirá de guía para explicar el proceso de lectura. Los comandos empleados que se aprecian en la Ilustración son:

1. if(“comienzo tarea distinto final tarea”) este comando sirve para detectar los intervalos en los que el trabajador está ocioso, y que, por tanto, no se han de representar
2. x= c(“comienzo de la tarea”, “final de la tarea”), traza en el eje de las abscisas la tarea, desde el principio hasta su finalización, de un cierto color.
3. y=c(“altura de comienzo para el dibujo”, “altura del final para el dibujo”), traza en el eje de las ordenadas. Va de uno a uno pues el operario uno se representa con una línea que siempre está a la altura uno.
4. mode=”líneas”, es decir, se usa el modo de líneas.
5. line= list(color = “color aleatorio”, “ancho igual a diez milímetros”), es decir, según el índice “i” se elegirá un color distinto para la línea y su ancho será de diez milímetros.
6. showlegend=F se emplea la leyenda que se define en otra parte del código
7. hoverinfo=” text”, en el programa R, al pasar el ratón por encima de la tarea representada se pueden ver todos sus datos, almacenados en la clase “text”.

En este caso se trata del código para leer los datos del primer operario “Area1\_1.Task”. El comando “text= paste” almacena todos estos datos en la clase “text”. El bucle “for” lee en cada iteración una tarea “df$Area1\_1.Task[i]”, su comienzo global “df$Area1\_1.TaskBeginning[i]”, su final global “df$Area1\_1.TaskEnd[i]”, su comienzo en el área “df$Area1\_1.StartInThisArea[i]”, su final en el área “df$Area1\_1.StartInThisArea[i], el número de operarios globales necesarios “df$Area1\_1.NumberOfWorkers[i], y el número de operario empleado área “df$Area1\_1.Worker[i].

El índice “i” está comprendido entre 0 y “nrow(df)” que es una función que nos da el número de líneas del fichero “.txt”, es decir, el total de líneas que debemos leer. En la Ilustración 17 se puede ver como estos mismos nombres sin “df$” y sin “[i]” están contenidos en la salida en “.txt”. Los correspondientes al primer trabajador se encuentran recuadrados.

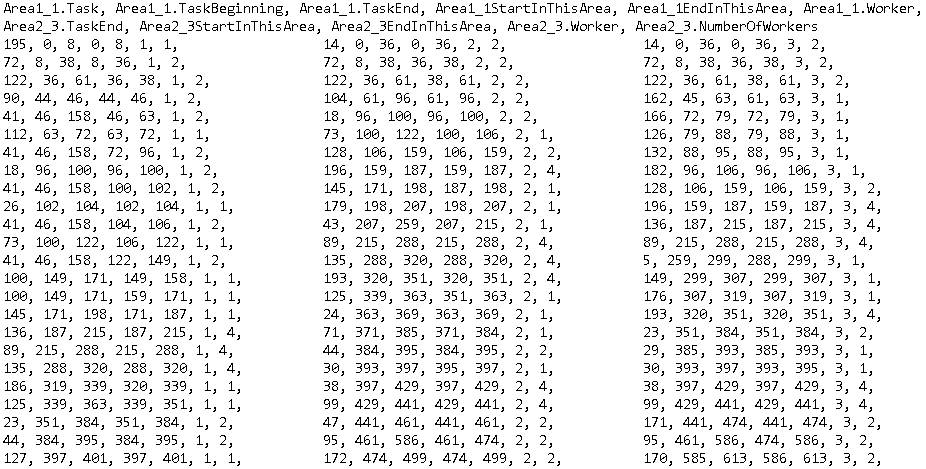


Ilustración 17: entrada de datos para el programa implementado en R

El comando “df$” más la variable lo que hace es almacenar en R los datos correspondientes a esa variable según el índice “i” de forma que la primera línea de números recuadrada en la imagen, correspondiente a “i=0”, será lo primero que se leerá. A continuación, y siguiendo la fila se seguirán leyendo datos de otros trabajadores, hasta llegar al final de la fila en el que no hay ninguna coma, y, por tanto, se produce el salto de línea para seguir la lectura y el incremento del subíndice “i” en una unidad. Una vez más se leerían los datos correspondientes a la tarea que debe realizar el primer trabajador, en este caso correspondientes a “i=1”, que se encuentran justo debajo del recuadro correspondiente a “i=0”. Este proceso se repite hasta terminar la lectura de todos los datos.

Con global se hace referencia a que la tarea en cuestión puede ejecutarse en otras áreas de manera que el comienzo y el principio de la tarea en el área, en general, serán distintos al comienzo y final globales. Comienzo global es el comienzo de la tarea y final global es el final independientemente del trabajador que las realice, (pueden ser varios). El número de operarios globales son los operarios que necesita simultáneamente la tarea para ejecutarse y el número de operario es el operador en concreto que para este caso de ejemplo será siempre el número 1, pues es el primer operario.

Como ya se ha comentado, el comando “hoverinfo” hace que la información correspondiente a cada tarea puede verse en R simplemente posicionando el ratón encima de dicha tarea como se puede ver en la Ilustración 18.

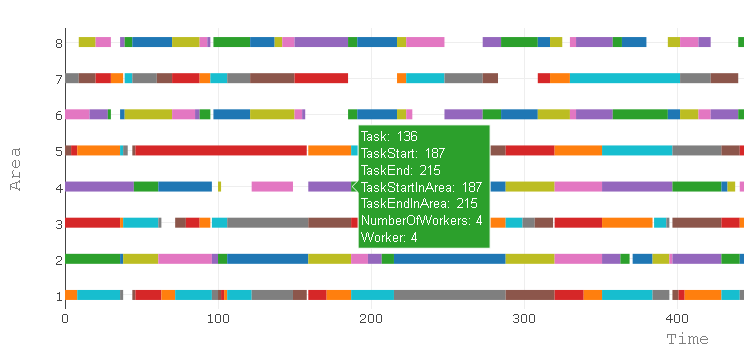


Ilustración 18: información de la tarea

En este caso se puede ver que se trata de la tarea 136, que comienza en el instante 187 y finaliza en el 215 tanto en esa área como globalmente, que el número de empleados necesarios trabajando simultáneamente es cuatro y que este es el cuarto operario.

## 7.3. Salida de datos en R

Para realizar la salida una vez almacenados los datos simplemente se ejecuta este código que se puede apreciar en la Ilustración 19.

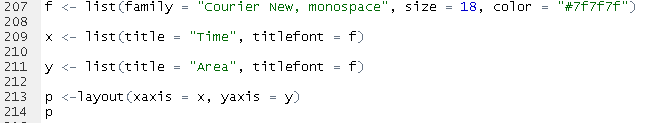


Ilustración 19: código para la salida en R

Se define “f” que es la fuente en la que se escribirán los títulos del eje x “Time” y el del eje y “Area”. Esta fuente es de tamaño 18, color negro, que corresponde al código “#7f7f7f” y de tipo “Courier New” con monoespaciado. Por último, se da la orden de dibujar todos los datos almacenados en x y en y. En x se pintará la tarea de principio a fin de un color aleatorio a la altura y que sea necesaria. Esta altura será uno para el trabajador uno, dos para el trabajador dos, y así sucesivamente. Además, en cada tarea se almacenan más datos que se pueden visionar pasando el ratón por encima como ya se ha comentado previamente.

Tras explicar el funcionamiento del código en C y en R se procederá a comentar los experimentos que se han implementado y los datos adicionales empleados para obtener los resultados del proyecto.

# 8. Experimentos desarrollados

Una vez expuesto todo el soporte teórico, el diseño e implementación de los programas, se deben desarrollar los experimentos que se desean realizar. En este Capítulo se especifican los experimentos cuya realización responde a la necesidad de obtener todas las salidas que requería el cliente. Han sido necesarias ciertas modificaciones en los programas en C y en R, para poder realizar todos estos experimentos en todas sus variantes.

## 8.1. Introducción

El software empleado para tratar los datos resultantes de los diferentes experimentos han sido R y Excel. Para obtener el Gantt se ha empleado R, mientras que para el resto de datos de salida se ha empleado Excel. Las instancias proporcionadas por Airbus que han sido resueltas son:

1. Instancia de 91 tareas
2. Instancia de 159 tareas
3. Instancia de 204 tareas

Para las instancias de 91 y 159 tareas se ha desarrollado un experimento, mientras que, para la instancia de 204 tareas, se han realizado ocho. En todos los experimentos desarrollados se obtiene la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el paso de las iteraciones, es decir, como éste va mejorando. Además, se incluye comienzo y final de cada tarea, la posición en la que ha sido secuenciada y los recursos consumidos. Para la instancia de 204 tareas, se obtiene también en todos los experimentos el porcentaje de ocupación de cada trabajador y el porcentaje de ocupación medio para cada tipo y para todos los trabajadores. También para los experimentos realizados sobre esta instancia, se obtienen los tiempos de ejecución, en vistas de analizar la eficacia y eficiencia de los distintos experimentos realizados en esa instancia.

## 8.2. Instancia de 91 tareas

Para esta instancia se ha obtenido el Gantt en R, el motivo de este experimento es simplemente verificar el correcto funcionamiento del programa y demostrar que es capaz de resolver instancias con diferentes características a la mayormente tratada en el proyecto, la instancia de 204 tareas. En la Tabla 4 se pueden apreciar sus características principales.

|  |  |
| --- | --- |
| Tareas | Esta instancia consta de 91 tareas |
| Trabajadores | Dos tipos de trabajadores. Cinco Mecánicos y tres Estructurales disponibles |
| Áreas | Dos tipos de área. La capacidad del área 1 es de 5 y la del área 2 de 3 |
| Precedencias | Hasta dos sucesores |
| Consecutivas | Sin tareas que deban ejecutarse de manera consecutiva |
| Restricción No Paralela | Sin tareas que no puedan ejecutarse a la vez |
| Modos | Hasta dos modos |

Tabla 4: características de la instancia de 91 tareas

La experimentación con esta instancia, la de especificaciones más simples y de menor tamaño, resultó de gran utilidad para una primera verificación del modelo. Se comprueba que la resolución de esta instancia da los resultados esperados, ya que además de asemejarse a la solución obtenida en el proyecto mayor de Airbus, no contiene errores como por ejemplo un mal descontado de los recursos de una tarea que se haya programado, una mala asignación de la tarea a programar, entre otros. Esos errores, muy sencillos de ver mediante la depuración del código o la mera observación del Gantt de salida, fueron más sencillos de comprobar si cabe gracias a la simpleza de esta instancia.

## 8.3. Instancia de 159 tareas

La resolución de esta instancia tiene objetivos idénticos a la de la instancia de 91 tareas, pero ésta cuenta con una complejidad mayor además de un mayor número de tareas. La verificación de los resultados de este experimento, que tiene como salida un Gantt, se realizó a continuación de la verificación del experimento realizado con la instancia de 91 tareas. Sus características se encuentran expuestas en la Tabla 5

|  |  |
| --- | --- |
| Tareas | Esta instancia consta de 159 tareas |
| Trabajadores | Dos tipos de trabajadores. Cinco Mecánicos y tres Estructurales disponibles |
| Áreas | Dos tipos de área. La capacidad del área 1 es de 5 y la del área 2 de 3 |
| Precedencias | Hasta tres sucesores |
| Consecutivas | Sin tareas que deban ejecutarse de manera consecutiva |
| Restricción No Paralela | Sin tareas que no puedan ejecutarse a la vez |
| Modos | Hasta cinco modos |

Tabla 5: características de la instancia de 159 tareas

La resolución de esta tarea y la depuración del código asociado, permitió detectar un error, y tras su corrección, ya podía verificarse el modelo para la instancia más compleja y con la que más resultados se han obtenido para este proyecto, la instancia de 204 tareas.

## 8.4. Instancia de 204 tareas con recursos fijados

Para esta instancia se han desarrollado múltiples experimentos, obteniéndose muy buenos resultados. Se fijan recursos de trabajadores y áreas y se aplican diferentes métodos para elegir el modo en el que se ejecutan ciertas tareas (las de más de un modo) para obtener los diferentes experimentos. Sus características se resumen en la Tabla 6. Por simplicidad, y debido que es tal y como está determinado en las especificaciones de la instancia, se toman cinco operarios de capacidad para el tipo Mecánico, que siempre consumen recursos del área 1, de capacidad 5, y lo mismo sucede para los operarios Estructurales y el área 2, que tienen capacidad 3. Esto no sucede así para la instancia “204B”, como se explicará a posteriori.

|  |  |
| --- | --- |
| Tareas | Esta instancia consta de 204 tareas |
| Trabajadores | Dos tipos de trabajadores. Cinco Mecánicos y tres Estructurales disponibles |
| Áreas | Dos tipos de área. La capacidad del área 1 es de 5 y la del área 2 de 3 |
| Precedencias | Hasta cuatro sucesores y tres predecesores |
| Consecutivas | Hasta tres tareas que deban ejecutarse de manera consecutiva |
| Restricción No Paralela | Sin tareas que no puedan ejecutarse a la vez |
| Modos | Hasta cuatro modos |

Tabla 6: características de la instancia de 204 tareas

Todos los experimentos realizados con la instancia de 204 tareas han sido verificados y contrastados con Airbus, y sus resultados son correctos. A continuación, se explicará cada uno de los experimentos realizados para en el Capítulo 9 exponer sus resultados.

### 8.4.1. Experimentos con modos

Como ya se ha comentado en Capítulos previos, cada modo añade una forma distinta de resolver una tarea en concreto. Por ejemplo, una tarea que tenga cuatro modos podrá resolverse de cuatro maneras distintas. Según las especificaciones de esta instancia, para los distintos modos se mantiene tanto área como operarios utilizados, pero varía su número, de manera que al aumentar éstos, disminuye de manera proporcional la duración empleada para ejecutar la tarea como se puede ver en la Tabla 7 que representa los distintos modos en los que se puede resolver la tarea 108. Esta tarea utiliza operarios de tipo Mecánico y el Area 1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Modo | Duración | Operarios | Área |
| 1 | 36 | 1 | 1 |
| 2 | 18 | 2 | 2 |
| 3 | 12 | 3 | 3 |
| 4 | 9 | 4 | 4 |

Tabla 7: modos en los que se puede resolver la tarea 108

Esta instancia consta de seis tareas con más de un modo, dos de ellas con cuatro modos y dos de ellas con dos. Se han desarrollado cuatro experimentos en los que se emplean diferentes configuraciones de modos:

1. **Modos mínimos:** siempre se usa el modo que emplea el mínimo de trabajadores y recursos de área. Es la que mejores resultados ofrece
2. **Modos máximos:** siempre se usa el modo que emplea el máximo de trabajadores y recursos de área
3. **Modos mínimo y máximo alternos:** se alterna modo mínimo y máximo de manera que, si una tarea con más de un modo se programa con modo mínimo, la siguiente que se programe empleará su modo máximo, la siguiente, modo mínimo, y así sucesivamente
4. **Modo aleatorio:** se emplea un modo elegido de manera aleatoria.

### 8.4.2. Algoritmo tipo greedy o glotón

Como ya se ha comentado en el proyecto, el secuenciado se realiza siguiendo la regla de prioridad GRPW y aplicando aleatorización sesgada. El objetivo de este experimento es resolver la instancia de 204 tareas aplicando dicha regla de prioridad, pero no la aleatorización sesgada, siendo siempre la tarea de mayor peso la que se programará (de ahí el nombre, glotón).

Se obtienen resultados peores que aplicando aleatorización sesgada, como era de esperar y sólo existe una solución posible, sin influir ni la variación del valor de la semilla aleatoria ni el número de iteraciones. La solución es, por tanto, determinista, en contraste con el resto de soluciones que se obtienen en el proyecto. El motivo es que al asignarse la tarea de mayor peso de entre las que estén disponibles en cada iteración, no existe margen para obtener soluciones diferentes.

### 8.4.3. Instancia 204B

Se experimenta con la instancia de 204 tareas, pero con las tareas con más de un modo con sus modos modificados con lo que tendríamos para los distintos modos de una tarea, diferentes combinaciones posibles de tipos de operarios y de área. Esto contrasta con la experimentación realizada hasta ahora sobre la instancia de 204 tareas. Esta instancia modificada se conoce como “instancia 204B”. Estos modos modificados pueden emplear combinaciones entre áreas y operarios, resultando hasta cuatro combinaciones posibles. Las duraciones empleadas por cada modo no se modifican. Los modos quedarían tal y como se describe en la Tabla 8.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tarea** | **Modo** | **Operarios Mecánicos** | **Operarios Estructurales** | **Área 1** | **Área 2** |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 81 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 94 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 157 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 101 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 3 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| 4 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 108 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 3 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| 4 | 4 | 0 | 4 | 0 |

Tabla 8: tareas con más de un modo para la instancia 204B

Se resolverá la instancia 204B empleando modos aleatorios, 40000 iteraciones y criterio de parada de 20000 iteraciones sin mejora de la solución.

## 8.5. Instancia de 204 con recursos fijados al comienzo de la ejecución

Para este caso, se pedirá que se introduzca por pantalla al comienzo de la ejecución del programa los recursos de trabajadores que serán los mismos que los recursos de área por simplicidad. De esta forma si se estipulan cuatro operarios Mecánicos, la capacidad del área 1 sería de cuatro y si se estipulan tres Estructurales la capacidad del área 2 es de tres. Los Mecánicos siempre consumen recursos del área 1 y los Estructurales del área 2. El mínimo posible a introducir será de 4 operarios Mecánicos y 2 operarios Estructurales pues es el mínimo de operarios que exigen ciertas tareas del proyecto. De introducir un número menor, el programa volvería a pedir la introducción de los datos hasta que se le especifiquen unos factibles.

### 8.5.1. Criterio de parada con porcentaje frontera y con frontera inferior

Como ya se expuso en Capítulos previos, el criterio de parada se activa cuando una solución no es mejorada en un número determinado de iteraciones, en el caso más general se define como criterio de parada 20000 iteraciones.

Este criterio de parada no es todo lo eficiente que podría ser pues en algunos casos el programa consume mucho de tiempo de ejecución para al final acabar obteniendo una solución que podría haber obtenido en un tiempo mucho menor. Por este motivo y con el objetivo de añadir posibilidades al proyecto, se definen dos nuevos criterios de parada: porcentaje frontera global y frontera inferior o “Lower Bound”. El uso de uno u otro se escoge al principio del programa, y se introducen los datos adicionales necesarios. En ambos se puede emplear el número de operarios de tipo Mecánico y Estructural que se deseen, dentro de los límites permitidos ya que por ejemplo el número mínimo de empleados Mecánicos que debe haber es de cuatro.

Para el criterio de parada de porcentaje frontera, se define por teclado al comienzo de la ejecución del programa un porcentaje de ocupación global, de tal forma, que una vez ese límite es sobrepasado, el programa se detiene ya que se activa el criterio de parada, y se obtiene la solución. En la Ilustración 20 se puede comprobar los datos que se han de introducir. Si los datos introducidos no están en el formato correcto, el programa los pedirá de nuevo.

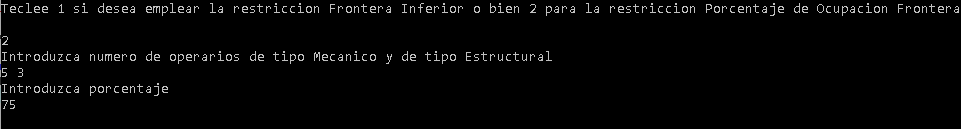


Ilustración 20: entrada de datos adicionales para aplicar porcentaje de ocupación frontera

Para el criterio de parada de frontera inferior, se ha debido añadir código adicional para calcular el total de horas de trabajo que requiere el proyecto para finalizarlo, en este caso se ha hecho el cálculo suponiendo todos los modos mínimos, llegándose a un total de 5766 horas, coincidiendo con el resultado obtenido por Airbus.

Para aplicar este criterio, se introduce por teclado al principio de la ejecución del programa, el tiempo de ciclo. El cociente entre el total de horas previamente calculadas y el tiempo de ciclo, truncado hacia arriba, nos permitirá obtener el número de empleados mínimos que se necesitarán para resolver el problema.

De esta forma, si el programa emplea los mismos o más operarios, que los definidos por esta frontera inferior, se activará inmediatamente el criterio de parada y se llegará al fin del programa. Los datos a introducir por pantalla se pueden ver en la Ilustración 21.

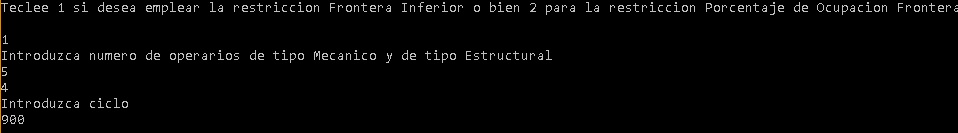


Ilustración 21:entrada de datos adicionales para aplicar Frontera Inferior

A modo de ejemplo, se halla una frontera inferior para un tiempo de ciclo de 900. Al hacer el cociente entre total de horas que es 5766 y el tiempo de ciclo que es 900, se obtiene un valor de 6.4, por lo que, como mínimo, serán necesarios 7 empleados para resolver el problema.

Para estos dos últimos criterios de parada, se obtienen tiempos de ejecución menores como se verá en el Capítulo de Resultados y Análisis de Resultados.

### 8.5.2. Evolución del tiempo de finalización del proyecto frente al número de trabajadores

Este experimento resulta muy habitual y muy útil para ver si los resultados son lógicos. En este caso y para la instancia de 204 tareas y aplicando el modo mínimo, se resuelve la instancia desde los operarios mínimos posibles, que son seis, cuatro de tipo mecánico y dos de tipo estructural, hasta que la solución no mejora por mucho que se incremente el número de empleados, lo que sucede a partir de los 23 operarios. Deberá introducirse por pantalla al comienzo de la ejecución del programa, el número de operarios.

Una vez expuestos los experimentos que se van a realizar, que son un total de 10, uno para la instancia de 91 tareas, otro para la instancia de 159 tareas, y ocho para la instancia de 204 tareas, queda exponer los resultados obtenidos y analizar si estos son lógicos y satisfactorios. Los experimentos a realizar serán:

1. Instancia de 91 tareas
2. Instancia de 159 tareas
3. Instancia de 204 tareas: modo mínimo
4. Instancia de 204 tareas: modo máximo
5. Instancia de 204 tareas: alternar modo mínimo y máximo
6. Instancia de 204 tareas: modo aleatorio
7. Instancia de 204 tareas: algoritmo tipo glotón
8. Instancia de 204 tareas: instancia 204B
9. Instancia de 204 tareas: criterio de parada con porcentaje frontera y con frontera inferior
10. Instancia de 204 tareas: variación del tiempo de finalización frente al número de operarios

En el siguiente Capítulo se expondrán los resultados de los experimentos en forma de gráficas y tablas, para después analizar estos resultados mediante el uso de gráficos y tablas que permitirán comparar resultados de diferentes experimentos.

# 9. Resultados y Análisis de Resultados

Una vez realizados todos los pasos necesarios para la resolución del proyecto sólo queda el último y el más importante, la comprobación de que los resultados obtenidos tras tanto trabajo son los esperados, y si el proyecto realmente es útil tanto para una empresa como Airbus como para otras empresas que tengan problemas para obtener el secuenciado de tareas que acometan en sus respectivas fábricas. Los resultados se expondrán en el mismo orden en el que se hizo la descripción de los experimentos del Capítulo anterior.

## 9.1. Instancia de 91 tareas

En este caso y para todos los Gantt que se obtienen en el proyecto, se realiza el equilibrado de la carga de trabajo dentro del mismo tipo de trabajador. De esta forma, se puede comprobar que la carga de trabajo de los operarios de tipo Mecánico, que van del número 1 al 5 inclusive, se encuentra equilibrada, así como la de los operarios de tipo Estructural que son los que aparecen en el eje de ordenadas correspondientes a los números 6, 7 y 8. Salvo que se especifique lo contrario, siempre se usa esta disposición de trabajadores en los experimentos, así como una capacidad de Area 1 de 5 unidades y de 3 unidades para el Area 2.

El eje de abscisas, representa el tiempo en horas. Para este caso se emplean 400 iteraciones y un criterio de parada de 200 iteraciones sin mejorar el tiempo de finalización del proyecto. La solución obtenida representada mediante un Gantt se puede ver en la Ilustración 22.

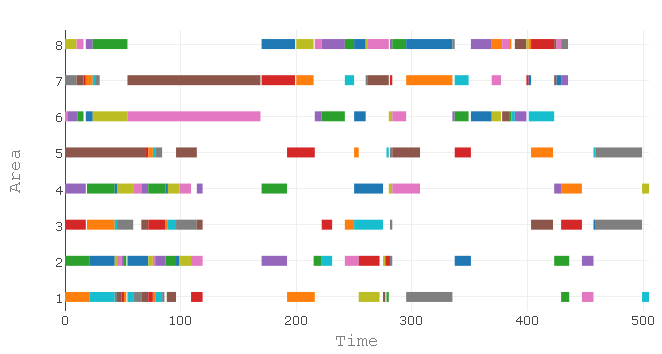


Ilustración 22: Gantt para la Instancia de 91 tareas

Se obtiene un tiempo de finalización del proyecto de 505 horas, como se puede comprobar en la Ilustración 23, que representa la evolución (mejora) del tiempo de finalización a medida que aumentan las iteraciones. No se activa el criterio de parada y la solución final se obtiene para la iteración número 400.

Ilustración 23: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 91 tareas

## 9.2. Instancia de 159 tareas

De manera análoga a la instancia de 91 tareas, se obtiene el Gantt, que se puede ver en la Ilustración 24, con cargas equilibradas según tipo de trabajador. Para este caso se emplean 450 iteraciones y criterio de parada de 200 iteraciones sin mejorar.

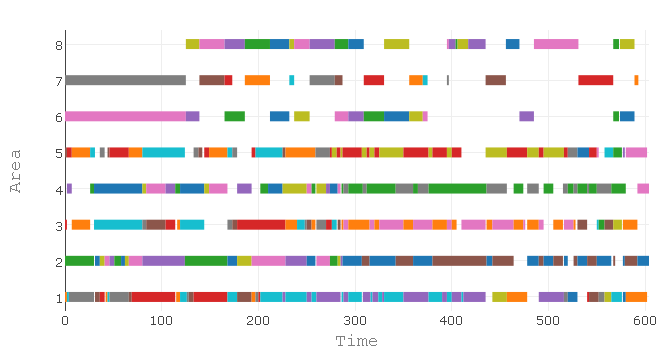


Ilustración 24: Gantt para la instancia de 159 tareas

Se obtiene un tiempo de finalización del proyecto de 784 horas, como se puede comprobar en la Ilustración 25, que representa la evolución (mejora) del tiempo de finalización a medida que aumentan las iteraciones. No se activa el criterio de parada y la solución final se obtiene para la iteración número 411.

Ilustración 25: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 159 tareas

## 9.3. Instancia de 204 tareas con recursos fijados

Esta instancia es la que se trata con mayor profundidad en el proyecto y en el Capítulo anterior ya se comentaron sus características.

### 9.3.1. Modos mínimos

En este caso se emplean los modos que utilizan un menor número de recursos (trabajadores y área). Se establece un número de iteraciones de 40000 con un criterio de parada de 20000 iteraciones sin una mejora de la solución. En este caso si se activa el criterio de parada y la mejor solución conseguida es la de un tiempo de finalización del proyecto de 809 en la iteración 17636. Se muestra el Gantt resultante en la Ilustración 26, y la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el número de iteraciones en la Ilustración 27. El tiempo de ejecución es de 642,03 segundos.

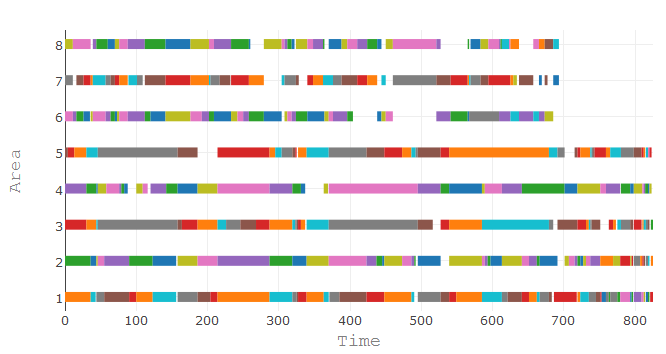


Ilustración 26: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos mínimos

Ilustración 27: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos mínimos

No se aprecian mejoras considerables para el tiempo de finalización del proyecto a partir de la iteración 2544. Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 28.

Ilustración 28: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos mínimos

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 97,5%, para los operarios de tipo Estructural del 73,21% y una ocupación global del 88,38%.

### 9.3.2. Modos máximos

En este caso se emplean los modos que utilizan un mayor número de recursos (trabajadores y área). Se establece un número de iteraciones de 40000 con un criterio de parada de 20000 iteraciones sin una mejora de la solución. En este caso no se activa el criterio de parada y la mejor solución conseguida es la de un tiempo de finalización del proyecto de 815 en la iteración 22475. Se muestra el Gantt en la Ilustración 29, y la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el número de iteraciones en la Ilustración 30.

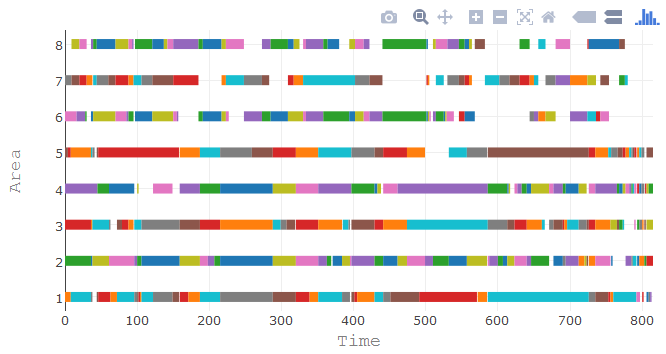


Ilustración 29: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos máximos

Ilustración 30: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos máximos

No se aprecian mejoras considerables para el tiempo de finalización del proyecto a partir de la iteración 2404. Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 31. El tiempo de ejecución es 758,62 segundos.

Ilustración 31: Porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos máximos

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 96,02%, para los operarios de tipo Estructural del 72,68% y una ocupación global del 87,27%.

### 9.3.3. Modos máximos y mínimos alternos

En este caso se emplean los modos de manera alternativa, si primero se emplea para una tarea con más de un modo, el modo mínimo, para la siguiente tarea con más de un modo se empleará el modo máximo y viceversa. Se establece un número de iteraciones de 40000 con un criterio de parada de 20000 iteraciones sin una mejora de la solución. En este caso se activa el criterio de parada y la mejor solución conseguida es la de un tiempo de finalización del proyecto de 814 en la iteración 2426. Se muestra el Gantt en la Ilustración 32, y la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el número de iteraciones en la Ilustración 33.

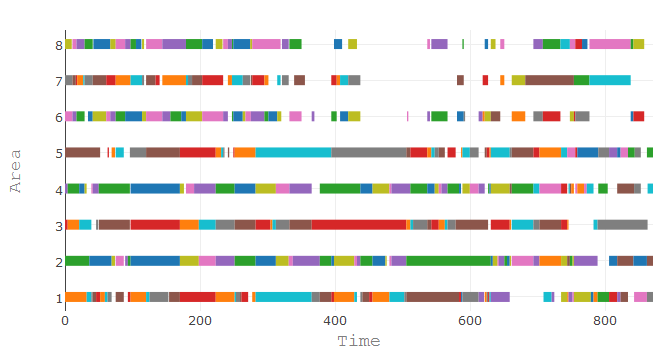
Ilustración 32: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos

Ilustración 33: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos

Se aprecian mejoras considerables para el tiempo de finalización del proyecto a lo largo de toda la ejecución y el criterio de parada se activa para la iteración 22426. Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 34. El tiempo de ejecución es 387,80 segundos.

Ilustración 34: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 93,78%, para los operarios de tipo Estructural del 72,77% y una ocupación global del 85,90%.

### 9.3.4. Modos aleatorios

En este caso se emplean los modos de manera aleatoria. Se establece un número de iteraciones de 40000 con un criterio de parada de 20000 iteraciones sin una mejora de la solución. En este caso se activa el criterio de parada y la mejor solución conseguida es la de un tiempo de finalización del proyecto de 810 en la iteración 9794.

Los modos empleados para obtener dicha solución en las tareas con más de un modo son: para la tarea 4 el modo 2, para la tarea 81 el modo 1, para la tarea 94 el modo 1, para la tarea 157 el modo 2, para la tarea 101 el modo 2, para la tarea 108 el modo 1. Para el resto de tareas se emplea el único modo de resolución del que disponen. Se muestra el Gantt en la Ilustración 35, y la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el número de iteraciones en la Ilustración 36.

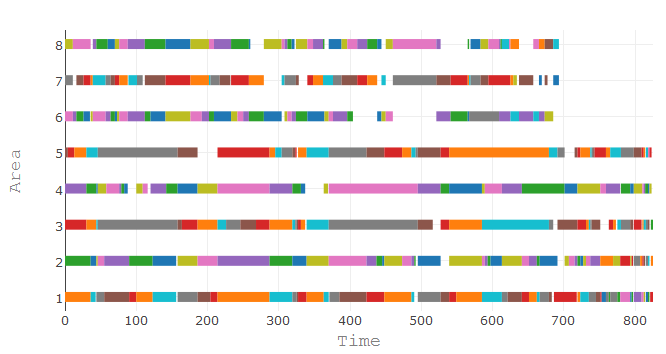


Ilustración 35: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios

Ilustración 36: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios

Se aprecian mejoras considerables hasta la iteración 2535. Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 37. El tiempo de ejecución es 521,15 segundos.

Ilustración 37: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 94,81%, para los operarios de tipo Estructural del 73,13% y una ocupación global del 86,68%.

### 9.3.5. Algoritmo tipo greedy o glotón

En este caso se emplea la regla de prioridad GRPW, pero no la aleatorización sesgada. No se definen iteraciones ni criterio de parada pues la solución conseguida será siempre la misma sea cual sea la semilla. Se obtiene un tiempo de finalización de 824 horas empleando modos mínimos. Se muestra el Gantt en la Ilustración 38.

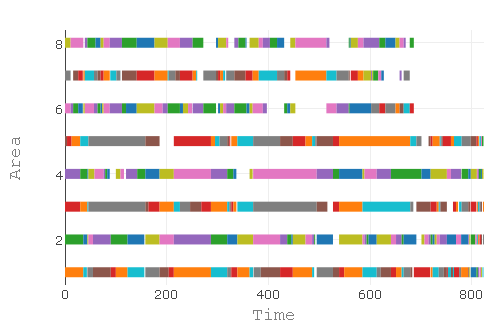


Ilustración 38: Gantt para la instancia de 204 tareas resuelta sin aleatorización sesgada

Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 39. El tiempo de ejecución es 10 segundos.

Ilustración 39: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas resuelta sin aleatorización sesgada

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 95%, para los operarios de tipo Estructural del 71,9% y una ocupación global del 86,33%.

### 9.3.5. Instancia 204B

En este caso se emplean los modos de manera aleatoria. Se establece un número de iteraciones de 40000 con un criterio de parada de 20000 iteraciones sin una mejora de la solución. En este caso se activa el criterio de parada y la mejor solución conseguida es la de un tiempo de finalización del proyecto de 786 en la iteración 12535.

Se muestra el Gantt en la Ilustración 40, y la evolución del tiempo de finalización del proyecto con el número de iteraciones en la Ilustración 41.

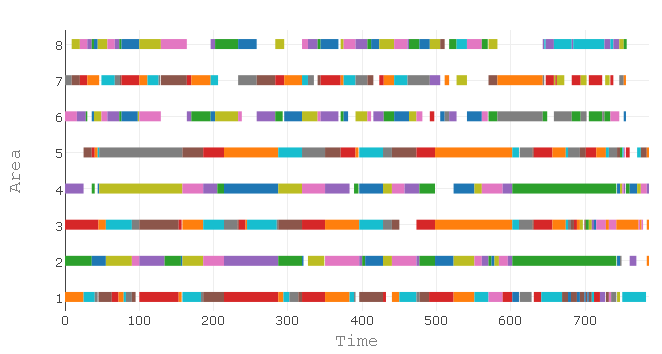


Ilustración 40: Gantt para la instancia 204B con modos aleatorios

Ilustración 41: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia 204B con modos aleatorios

Se aprecian mejoras considerables hasta la iteración 2536. El tiempo de ejecución es 784 segundos. Los modos empleados para obtener dicha solución en las tareas con más de un modo son: para la tarea 4 el modo 1, para la tarea 81 el modo 1, para la tarea 94 el modo 1, para la tarea 157 el modo 1, para la tarea 101 el modo 1, para la tarea 108 el modo 2. Las características de estos modos se exponen en la Tabla 8. Para el resto de tareas se emplea el único modo de resolución del que disponen.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tarea | Modo | Operarios Mecánicos | Operarios Estructurales | Area 1 | Area 2 |
| 4 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 81 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 94 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 157 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 101 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 108 | 3 | 0 | 3 | 0 | 3 |

Tabla 9: modos de las tareas con más de un modo para la solución de la instancia 204B con modos aleatorios

Como es lógico y puesto que tanto operarios Estructurales como el Area 2 son los recursos menos consumidos (con los porcentajes de ocupación más bajos), los modos seleccionados por el algoritmo para obtener la mejor solución tienden a consumir este tipo de recursos. En la instancia 204 las tareas con más de un modo siempre consumen empleados de tipo Mecánico y recursos del Area 1. En el Gantt de la Ilustración 42 se puede ver la solución para una de las tareas con más de un modo.

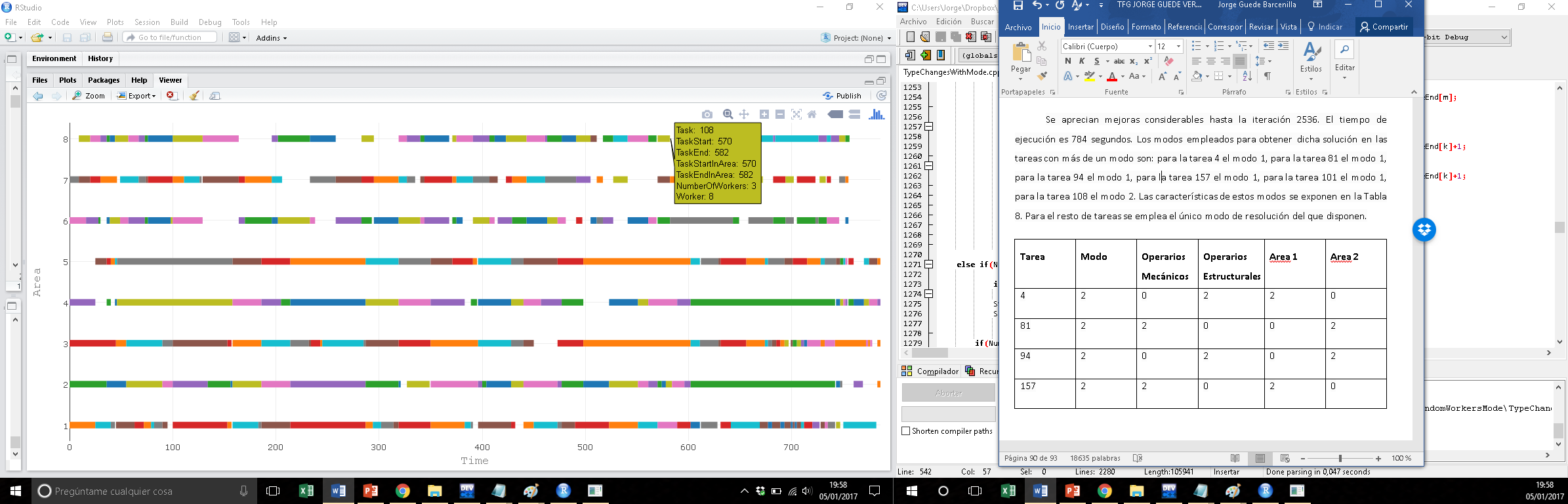


Ilustración 42: solución de una tarea con más de un modo

Se puede comprobar entonces, que el algoritmo funciona también cuando se combinan tipos de empleados y tipos de áreas. La tarea 108 es resuelta por operarios Estructurales (Worker 8) en el Area 2 (se ha recortado la imagen para que se vea bien el cuadro, pero se trata de la posición de área 8, correspondiente al área 2). Se obtiene también la ocupación de cada uno de los trabajadores, la ocupación por tipos, y la ocupación global, como se puede ver en la Ilustración 43.

Ilustración 43: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia 204B tareas con modos aleatorios

Se puede comprobar que los porcentajes dentro del mismo tipo de operarios se encuentran equilibrados, resultando un porcentaje de ocupación medio para los operarios de tipo Mecánico del 95,52%, que es mayor a los previamente hallados debido a que el tiempo de finalización del proyecto es menor. Este tiempo de finalización resulta menor porque tres de las seis tareas con más de un modo pasan a ser ejecutadas por operarios de tipo Estructural, que ven también incrementado su porcentaje de ocupación hasta el 78,7% y la ocupación global, también mayor a las previamente halladas, es del 89,20%.

Resulta así una solución más equilibrada que las anteriores, si bien no se tendrá en cuenta en el apartado de Análisis de Resultados, pues la instancia 204B no representa un caso real, sino que se trata de un mero experimento para demostrar que el algoritmo es capaz de resolver instancias que combinen tipos de operarios y tipos de áreas.

## 9.4. Instancia de 204 con recursos fijados al comienzo de la ejecución

Como ya se ha comentado, para esta instancia los recursos son introducidos por teclado al comienzo de la ejecución

### 9.4.1. Caso de Frontera Inferior

En este caso se introduce el tiempo de ciclo. La frontera inferior, será el total de la carga de trabajo entre el ciclo introducido, truncado hacia arriba. Si este número fuera 7.1, la frontera inferior sería 8, por ejemplo. En esta tabla se presentan diversos datos resultado de varias ejecuciones con distinto tiempo de ciclo. La carga total es de 5766 horas.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Operarios Totales** | **Tiempo de Ciclo** | **Frontera Inferior** | **Solución con Frontera Inferior** | **Tiempo de finalización solución (horas)** | **Tiempo de ejecución (segundos)** |
| 7 | 1020 | 6 | Si | 1053 | 3.814 |
| 7 | 1300 | 5 | No | 812 | 464 |
| 9 | 800 | 8 | Si | 880 | 6.55 |
| 9 | 1200 | 7 | No | 680 | 462 |

Tabla 10: resultados para el caso de Frontera Inferior

Este experimento o bien realiza una iteración, reduciendo enormemente el tiempo de ejecución y quedándose con la primera solución ya que se supera la frontera inferior y se activa el criterio de parada, o bien hace todas las iteraciones hasta terminar el programa

### 9.4.2. Caso de Porcentaje de Ocupación

En este caso se introduce el porcentaje de ocupación. Si este porcentaje de ocupación se ve superado, el programa sacará la solución. En esta tabla se presentan diversos datos resultado de varias ejecuciones con distinto porcentaje de ocupación fijados los recursos.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Operarios Totales** | **Porcentaje de Ocupación** | **Solución con Porcentaje de Ocupación** | **Tiempo de Finalización Solución (horas)** | **Tiempo de ejecución (segundos)** |
| 7 | 80 | Si | 986 | 6.909 |
| 7 | 85 | Si | 956 | 13.86 |
| 7 | 88 | Si | 936 | 72.75 |
| 7 | 90 | Si | 910 | 73 |
| 7 | 92 | No | 899 | 453 |

Tabla 11: resultados para el caso de Porcentaje de Ocupación

A medida que se incrementa el porcentaje de ocupación global exigido, se incrementa lógicamente el tiempo de ejecución necesario para alcanzar el criterio de parada, siendo para el 90% de ocupación necesarios 73 segundos de ejecución. Para un porcentaje de ocupación del 92%, no se activa el criterio de parada de porcentaje de ocupación, y el tiempo de ocupación crece enormemente puesto que se alcanzan las 40000 iteraciones empleadas habitualmente a lo largo de los experimentos.

### 9.4.3. Evolución del tiempo de finalización del proyecto frente al número de trabajadores

Como ya se expuso en el Capítulo anterior, se varía el número de operarios desde el mínimo hasta el número de operarios que permite obtener el mínimo del tiempo de finalización del proyecto, ya que a partir de esa frontera el aumento del número de operarios no conduce a nuevas reducciones. En la Ilustración 44 se puede ver la evolución del tiempo de finalización del proyecto frente al número de operarios.

Ilustración 44: tiempo de finalización frente a trabajadores

El aumento de operarios a partir de 11 no resulta rentable pues la reducción del tiempo de finalización es mínima, hasta los 23 operarios, que es dónde se alcanza el mínimo tiempo de finalización posible. El tiempo de finalización más alto, se obtiene para seis operarios, que es el mínimo de operarios que pueden usarse. El aumento a siete operarios representa una reducción de 112 horas, si se emplean nueve, se alcanza una reducción 335 horas desde los operarios mínimos. Esta opción parece la más satisfactoria, pues supone una reducción del 33,13% frente al tiempo de finalización inicial, una cifra considerable para un aumento de tres operarios.

## 9.5. Análisis de Resultados

En este apartado, se añadirán algunas gráficas y tablas para comparar resultados cuya observación en conjunto se considera interesante.

### 9.5.1. Porcentajes de ocupación

Se representan los resultados de porcentajes de ocupación de los experimentos en los que se emplearon diferentes configuraciones de modos. Se adjunta la Tabla 12, con todos los datos en tanto por ciento con dos cifras significativas, y la Ilustración 45 resultado de representar dicha tabla.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Glotón | Modos Mínimos | Modos Máximos | Modos Alternos | Modos Aleatorios |
| Operario 1 | 93,08 | 98,27 | 97,8 | 87,7 | 96,29 |
| Operario 2 | 96,6 | 99,5 | 96,69 | 97,12 | 96,29 |
| Operario 3 | 96 | 98,02 | 95,58 | 92,64 | 94 |
| Operario 4 | 94,78 | 91,84 | 94,6 | 92,52 | 94,4 |
| Operario 5 | 94,54 | 99,75 | 95,46 | 92,41 | 94,2 |
| Operario 6 | 71 | 74,78 | 72,52 | 63,44 | 73,9 |
| Operario 7 | 73,9 | 72,68 | 73,4 | 64,48 | 73 |
| Operario 8 | 72,45 | 72,18 | 72 | 65,75 | 73 |
| Mecánicos | 95 | 97,5 | 96 | 92,5 | 95 |
| Estructurales | 72,5 | 73,2 | 72,6 | 64,6 | 73,3 |
| Global | 86,54 | 88,38 | 87,27 | 82,01 | 86,88 |

Tabla 12: porcentajes de ocupación

La mejor solución obtenida, la que emplea modos mínimos, está muy cercana al óptimo, pues el recurso que limita la reducción del tiempo de finalización son los empleados Mecánicos, cuya ocupación es del 97,5%. Puede considerarse muy cercana al óptimo pues las propias restricciones de precedencias y consecutivas pueden crear restricciones adicionales que hacen muy difícil alcanzar el 100% de la ocupación. Además, el 100% de la ocupación no es deseable, pues la realidad es que un operario necesita hacer descansos con lo que podrá estar trabajando entre un 90 y un 95% del tiempo total de la jornada laboral.

Ilustración 45: porcentajes de ocupación

Tras exponer todos los resultados de los experimentos, que han sido muy buenos, y el análisis comparativo de ciertos resultados, se pasa a extraer conclusiones y a exponer las mejoras futuras que podría tener el proyecto de resultar de interés para algún cliente.

# 10. Conclusiones y líneas futuras

Tras exponer el Trabajo de Fin de Grado, resta sacar conclusiones de los resultados obtenidos y plantear las mejoras futuras que podrían aplicarse a este proyecto de suscitar interés a alguna o varias empresas.

## 10.1. Conclusiones

La variedad de soluciones y experimentos realizados, ofrece al cliente un gran número de posibilidades, por lo que los resultados de este proyecto se consideran satisfactorios. Además, en la mayoría de los casos, las soluciones no mejoran para un número de iteraciones superior a 2000 y para alcanzar ese número de iteraciones en general es suficiente con un tiempo de ejecución de 30 segundos como mucho. Este software ofrece por tanto posibilidades enormes para la toma de decisiones en muy poco tiempo, resultando de gran utilidad.

El programa realizado, resultaría de especial utilidad para industrias de características similares a la industria aeronáutica, esto es, tiempo para tener listo el pedido alto, poca demanda y necesidad en la optimización del proceso para reducir costes mediante el uso de la menor cantidad de recursos posible. Ejemplos de industrias que cumplen estas características pueden ser, coches de lujo, aeroespacial y naviera. Se concluye por tanto que este proyecto, con ciertas modificaciones, podría ser vendido a una amplia variedad de clientes, mejorando así su rentabilidad.

## 10.2. Líneas futuras

Se presentan las mejoras futuras posibles para el proyecto

### 10.2.1. Aumento de posibilidades de trabajadores para la obtención del Gantt

A día de hoy, el programa sólo obtiene el Gantt para cinco trabajadores Mecánicos y tres Estructurales, debido a la dificultad de crear un código que de forma general extraiga los datos de salida con la disposición adecuada para hacer el Gantt y a la complicación del equilibrado de la carga.

Sería de gran utilidad mejorar ambos códigos de forma que, para cualquier posibilidad de trabajadores y número de tipos de trabajadores, se obtenga el Gantt sin ninguna dificultad.

### 10.2.2. Aumento de la cantidad de Instancias que puede resolver el código

Además de las limitaciones expuestas en el apartado anterior, el código tiene algunas más:

1. Sólo lee datos de entrada en “.txt” y saca datos en “.txt”: sería conveniente añadir formatos para la entrada y la salida de datos
2. Sólo es capaz de secuenciar tareas con un máximo de tres predecesores y cuatro sucesores: debido a la dificultad de implementar un código que secuencie tareas independientemente del número de predecesores y sucesores
3. Sólo es capaz de secuenciar tres tareas que sean consecutivas: una vez más debido a la dificultad de desarrollar un código generalista
4. Mejorar la interfaz de entrada de datos: se hace a través de la consola, puede ser antiestético para un cliente que quiera probar el programa por sí mismo y usar diferentes entradas de datos para ver la salida que se obtiene

### 10.2.3. Unificación del programa desarrollado en C

Por sencillez y facilitar la depuración, para cada experimento se creó una carpeta en la que están entrada y salida de datos y los programas en C y en R desarrollados para ese experimento en concreto. Sería conveniente unificar todos los experimentos de manera que un solo programa efectuara todos a gusto del cliente, según los parámetros de entrada que seleccione y la salida que desee.

Con las conclusiones y las líneas futuras, concluye este Trabajo de Fin de Grado y se da paso a los Índices de Ilustraciones y Tablas y a los Anexos.

índice de Ilustraciones

[Ilustración 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 rojos corresponden a las tareas que no pueden ejecutarse a la vez. 3](#_Toc472272622)

[Ilustración 2: esquema del “case 8.3”. En esta imagen se pueden ver los valores de los pesos de cada tarea. 3](#_Toc472272623)

[Ilustración 3: datos de entrada recogidos en un “.txt”. Los recuadros están numerados de manera que se corresponden con los datos enumerados previamente. 14](#_Toc472272624)

[Ilustración 4: datos de entrada correspondientes a la instancia recogidos en un “.txt”. 36](file:///C:\Users\Jorge\Dropbox\jorge_guede\TFG%20RESULTADOS\Escribir\VERSION%206\TFG%20JORGE%20GUEDE%20VERSION%206.docx#_Toc472272625)

[Ilustración 5: librerías, constantes y parte de las variables. 43](#_Toc472272626)

[Ilustración 6: variables de tipo de dato real. 43](#_Toc472272627)

[Ilustración 7: obtención del tiempo de ejecución del programa 44](#_Toc472272628)

[Ilustración 8: apertura de fichero de datos de entrada y escaneo de las primeras variables 45](#_Toc472272629)

[Ilustración 9: captura de los datos de entrada 45](#_Toc472272630)

[Ilustración 10: obtención del peso de cada tarea 47](#_Toc472272631)

[Ilustración 11: comienzo del programa principal 47](#_Toc472272632)

[Ilustración 12: salida del bucle y criterio de parada. 49](#_Toc472272633)

[Ilustración 13: inicialización de la semilla y obtención del número aleatorio que se usará para seleccionar la tarea a programar 50](#_Toc472272634)

[Ilustración 14: salida del programa implementado en R 53](#_Toc472272635)

[Ilustración 15: comienzo del código implementado en R 54](#_Toc472272636)

[Ilustración 16: código para leer los datos del primer trabajador 55](#_Toc472272637)

[Ilustración 17: entrada de datos para el programa implementado en R 56](#_Toc472272638)

[Ilustración 18: información de la tarea 57](#_Toc472272639)

[Ilustración 19: código para la salida en R 58](#_Toc472272640)

[Ilustración 20: entrada de datos adicionales para aplicar porcentaje de ocupación frontera 67](#_Toc472272641)

[Ilustración 21:entrada de datos adicionales para aplicar Frontera Inferior 67](#_Toc472272642)

[Ilustración 22: Gantt para la Instancia de 91 tareas 70](#_Toc472272643)

[Ilustración 23: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 91 tareas 70](#_Toc472272644)

[Ilustración 24: Gantt para la instancia de 159 tareas 71](#_Toc472272645)

[Ilustración 25: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 159 tareas 72](#_Toc472272646)

[Ilustración 26: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos mínimos 73](#_Toc472272647)

[Ilustración 27: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos mínimos 73](#_Toc472272648)

[Ilustración 28: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos mínimos 74](#_Toc472272649)

[Ilustración 29: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos máximos 75](#_Toc472272650)

[Ilustración 30: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos máximos 75](#_Toc472272651)

[Ilustración 31: Porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos máximos 76](#_Toc472272652)

[Ilustración 32: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos 77](#_Toc472272653)

[Ilustración 33: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos 77](#_Toc472272654)

[Ilustración 34: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos mínimo y máximo alternos 78](#_Toc472272655)

[Ilustración 35: Gantt para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios 79](#_Toc472272656)

[Ilustración 36: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios 79](#_Toc472272657)

[Ilustración 37: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas con modos aleatorios 80](#_Toc472272658)

[Ilustración 38: Gantt para la instancia de 204 tareas resuelta sin aleatorización sesgada 81](#_Toc472272659)

[Ilustración 39: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia de 204 tareas resuelta sin aleatorización sesgada 81](#_Toc472272660)

[Ilustración 40: Gantt para la instancia 204B con modos aleatorios 82](#_Toc472272661)

[Ilustración 41: evolución del tiempo de finalización del proyecto para la instancia 204B con modos aleatorios 83](#_Toc472272662)

[Ilustración 42: solución de una tarea con más de un modo 84](#_Toc472272663)

[Ilustración 43: porcentaje de ocupación de operarios, de tipos de operario, y porcentaje de ocupación global para la instancia 204B tareas con modos aleatorios 85](#_Toc472272664)

[Ilustración 44: tiempo de finalización frente a trabajadores 88](#_Toc472272665)

[Ilustración 45: porcentajes de ocupación 90](#_Toc472272666)

índice de Tablas

[Tabla 1: se adjuntan la duración, operarios mínimos (MinOp) y operarios máximos (MaxOp) necesarios para resolver cada tarea. Además, se añaden otros datos que no se emplearán para la resolución del ejemplo, significando “1” que se emplea ese recurso, y “0”, que no. Son los tipos de operarios, “Estructural” y “Mecánicos”, y las áreas de trabajo, “Area 1” y “Area 2”. 2](#_Toc472272680)

[Tabla 2: resultados tras la resolución manual. Se incluyen, duración, peso, número de iteración, inicio y final de tarea 5](#_Toc472272681)

[Tabla 3: principales reglas de prioridad y su criterio de programación de tareas 29](#_Toc472272682)

[Tabla 4: características de la instancia de 91 tareas 60](#_Toc472272683)

[Tabla 5: características de la instancia de 159 tareas 61](#_Toc472272684)

[Tabla 6: características de la instancia de 204 tareas 62](#_Toc472272685)

[Tabla 7: modos en los que se puede resolver la tarea 108 63](#_Toc472272686)

[Tabla 8: tareas con más de un modo para la instancia 204B 65](#_Toc472272687)

[Tabla 9: modos de las tareas con más de un modo para la solución de la instancia 204B con modos aleatorios 84](#_Toc472272688)

[Tabla 10: resultados para el caso de Frontera Inferior 86](#_Toc472272689)

[Tabla 11: resultados para el caso de Porcentaje de Ocupación 87](#_Toc472272690)

[Tabla 12: porcentajes de ocupación 89](#_Toc472272691)

# anexos

## A. Bibliografía

## B. Abreviaturas, unidades y acrónimos

## C. Glosario