

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de Organización Industrial

Modelado y resolución de problemas de  
secuenciación de tareas. Aplicación a una empresa de  
fabricación de electrodos

Autor: Fernando Carrasco Díaz

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

Dep. de Organización Industrial y Gestión de  
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2016





Trabajo de Fin de Grado  
Ingeniería de Organización Industrial

**Modelado y resolución de problemas de  
secuenciación de tareas. Aplicación a una empresa  
de fabricación de electrodos**

Autor:

Fernando Carrasco Díaz

Tutor:

Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado: Modelado y resolución de problemas de secuenciación de tareas. Aplicación a una empresa de fabricación de electrodos

Autor: Fernando Carrasco Díaz

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016



# AGRADECIMIENTOS

---

*Este trabajo va dedicado a mis padres, los cuales siempre creyeron en mí, a mis compañeros que han estado en este camino de cuatro años aprendiendo mano a mano, día a día y a los profesores que me inculcaron su pasión por el campo de la Organización Industrial.*

*Fernando Carrasco Díaz*

*Sevilla, 2016*

# RESUMEN

---

Este trabajo de Fin de Grado aborda el problema de la secuenciación de tareas en diversos escenarios para un horizonte temporal semanal donde se utilizarán distribuciones monotura y multiruta para procesar los trabajos y diferentes distribuciones de lote transferencia de piezas entre máquinas en taller con una configuración de tipo Job-Shop.

La construcción de los modelos parte de los datos obtenidos en un equilibrado de carga de máquinas propuesto por Arturo Romo de Vivar Reta en su proyecto de Fin de Master. Es por ello que el objetivo del trabajo será evaluar la viabilidad de los diferentes escenarios en función de las cargas máximas de las máquinas propuestas.

Los modelos buscarán reducir los tiempos de terminación de todas las operaciones y en especial la que representa el máximo de todas ellas. En base a este objetivo el modelo secuenciará el orden de las tareas en cada una de las máquinas. Los modelos realizados son de Programación Lineal Mixta Entera.

Los datos de aplicación provienen de una fábrica real cuya misión es la producción de electrodos.

# ÍNDICE

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                                       | <b>7</b>  |
| <b>RESUMEN</b>   | <b>8</b>  |
| <b>ÍNDICE</b>  | <b>9</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>                                      | <b>11</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                                     | <b>12</b> |
| <b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>1 INTRODUCCIÓN</b>  | <b>14</b> |
| 1.1 INTRODUCCIÓN   | 14        |
| 1.2 OBJETIVOS  | 15        |
| 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO                                   | 15        |
| <b>2 LA SECUENCIACIÓN</b>                                    | <b>17</b> |
| 2.1 ANTECEDENTES DE LA SECUENCIACIÓN                         | 17        |
| 2.2 NOTACIÓN Y CONCEPTOS                                     | 20        |
| 2.2.1 OBJETIVOS ( $\gamma$ )                                 | 21        |
| 2.2.2 ENTORNOS ( $\alpha$ )                                  | 22        |
| 2.2.3 RESTRICCIONES ( $\beta$ )                              | 23        |
| 2.2.4 PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO                             | 25        |
| 2.2.5 LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA                             | 26        |
| 2.2.6 LA PROGRAMACIÓN LINEAL                                 | 28        |
| <b>3 SECUENCIACIÓN DE TAREAS EN JOBSHOP: ESTADO DEL ARTE</b> | <b>30</b> |
| 3.1 LA SECUENCIACIÓN (SCHEDULING)                            | 30        |
| 3.2 EL JOBSHOP   | 30        |
| 3.3 LOTE DE TRANSFERENCIA (TRANSFER LOTS)                    | 34        |
| <b>4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>                            | <b>38</b> |
| 4.1 DESCRIPCIÓN  | 38        |
| 4.2 PUNTO DE PARTIDA: CARGA DE MÁQUINAS.                     | 40        |
| 4.2.1 DATOS Y RESULTADOS DE LA CARGA DE MÁQUINAS.            | 42        |
| <b>5 MODELADO DEL PROBLEMA</b>                               | <b>44</b> |
| 5.1 DESCRIPCIÓN  | 44        |
| 5.2 DATOS DEL PROBLEMA                                       | 45        |
| 5.2.1 ESCENARIO MONORUTA                                     | 45        |
| 5.2.2 ESCENARIO MULTIRUTA                                    | 47        |
| 5.3 MODELADO DEL PROBLEMA                                    | 51        |
| 5.3.1 MODELO DE LOTES COMPLETO                               | 52        |
| 5.3.2 MODELO DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO               | 55        |
| <b>6 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>                           | <b>60</b> |
| 6.1 MODELO DE PEQUEÑA ESCALA.                                | 61        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 6.1.1      | ELEMPLO 1  | 62         |
| 6.1.2      | EJEMPLO 2  | 64         |
| <b>6.2</b> | <b>ESCENARIO 1, MONORUTA DE LOTE COMPLETO</b>                                  | <b>66</b>  |
| <b>6.3</b> | <b>ESCENARIO 2, MULTIRUTA DE LOTE COMPLETO</b>                                 | <b>70</b>  |
| <b>6.4</b> | <b>ESCENARIO 3, MONORUTA DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO</b>                 | <b>74</b>  |
| <b>6.5</b> | <b>ESCENARIO 4, MULTITAREA DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO</b>               | <b>80</b>  |
| 6.5.1      | ANÁLISIS DEL MODELO: REDUCCIÓN A LOTE COMPLETO, MANTENIENDO FUNCIÓN OBJETIVO   | 87         |
| 6.5.2      | ANÁLISIS DEL MODELO: REDUCCIÓN A LOTE COMPLETO CON LOTE DE TRANSFERENCIA MIXTO | 87         |
| <b>6.6</b> | <b>ESCENARIO COMPARATIVO</b>   | <b>95</b>  |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | <b>100</b> |
| 7.1        | CONCLUSIONES   | 100        |
| 7.2        | LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO  | 101        |
| <b>8</b>   | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>102</b> |
| <b>9</b>   | <b>ANEXO</b>   | <b>105</b> |
| <b>9.1</b> | <b>ANEXO 1: CÓDIGO LINGO EJEMPLOS 1 Y 2 Y ESCENARIOS 1-4</b>                   | <b>105</b> |
| 9.1.1      | MODELO DE EJEMPLO 1  | 105        |
| 9.1.2      | MODELO DE EJEMPLO 2  | 105        |
| 9.1.3      | MODELO DE ESCENARIO 1  | 107        |
| 9.1.4      | MODELO DE ESCENARIO 2  | 109        |
| 9.1.5      | MODELO DE ESCENARIO 3  | 113        |
| 9.1.6      | MODELO DE ESCENARIO 4  | 118        |
| 9.1.7      | MODELO DE ESCENARIO 4  | 124        |
| 9.1.8      | MODELO DE LINGO DE APOYO A ESCENARIO 4, ANÁLISIS DE MODELO 2                   | 129        |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4-1 Resultado de equilibrado de cargas: Limite de cargas.                      | 43 |
| Tabla 5-1 Marco de datos de entrada del escenario monoruta                           | 46 |
| Tabla 5-2 Distribución de operaciones en máquinas en el entorno monoruta             | 47 |
| Tabla 5-3 Análisis de proporción real de piezas en rutas                             | 48 |
| Tabla 5-4 Marco de datos de entrada del escenario multiruta                          | 49 |
| Tabla 5-5 Distribución de operaciones en máquinas en el entorno multiruta.           | 50 |
| Tabla 5-6 Límites de tiempo en máquinas para caso monoruta y multiruta.              | 51 |
| Tabla 6-1. Necesidad de máquinas para ejemplos                                       | 61 |
| Tabla 6-2 Tiempos de procesado y demandas de las operaciones para ejemplos           | 61 |
| Tabla 6-3 Índice r de operación para ejemplos  | 62 |
| Tabla 6-4 Tiempos de set-up de las operaciones para ejemplos                         | 62 |
| Tabla 6-5 Datos de interés de Ejemplo 1  | 62 |
| Tabla 6-6 Secuencias en máquinas de Ejemplo 1  | 63 |
| Tabla 6-7 Tiempos de inicio, set-up y finalización de Ejemplo 1                      | 63 |
| Tabla 6-8 Datos de interés de Ejemplo 2  | 64 |
| Tabla 6-9 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2  | 64 |
| Tabla 6-10 Tiempos de inicio, set-up y finalización de Ejemplo 2                     | 64 |
| Tabla 6-11 Relación pieza-demandas Ejemplo 2   | 66 |
| Tabla 6-12 Datos de interés de Escenario 1.  | 66 |
| Tabla 6-13 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2                                       | 67 |
| Tabla 6-14 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 1.                            | 69 |
| Tabla 6-15 Datos de interés de Escenario 2.  | 70 |
| Tabla 6-16 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2                                       | 71 |
| Tabla 6-17 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 2.                            | 73 |
| Tabla 6-18 Datos de interés de Escenario 3.  | 74 |
| Tabla 6-19 Secuencias en máquinas de Ejemplo 3                                       | 75 |
| Tabla 6-20 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 3                             | 79 |
| Tabla 6-21 Datos de interés de Escenario 4.  | 80 |
| Tabla 6-22 Secuencias en máquinas de Ejemplo 4                                       | 81 |
| Tabla 6-23 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 4                             | 86 |
| Tabla 6-24 Tabla de cálculos para análisis de sensibilidad 2                         | 88 |
| Tabla 6-25 Datos de interés de Escenario 4, análisis de sensibilidad 2.              | 89 |
| Tabla 6-26 Secuencias en máquinas de Ejemplo 4, análisis de sensibilidad 2           | 90 |
| Tabla 6-27 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 4, análisis de sensibilidad 2 | 94 |
| Tabla 6-28 Mejora de Cmax  | 96 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1 Funciones del cuadro de la cadena de suministro                              | 19 |
| Ilustración 2 Diagramas de Gantt a) Orientación a máquinas b) Orientación a trabajos.      | 20 |
| Ilustración 3. Esquema $\beta$ = outtree   | 24 |
| Ilustración 4 Grafo de Jobshop   | 31 |
| Ilustración 5 Diagrama de árbol de B&B [Fernandez-Viagas, 2015]                            | 32 |
| Ilustración 6 Marco de técnicas de resolución de Job-shop [Jain and Meeran, 1998]          | 34 |
| Ilustración 7 Lote de transferencia en una misma máquina.                                  | 35 |
| Ilustración 8 Lote de transferencia en distintas máquinas cuando el tiempo $M1 < tiempoM2$ | 36 |
| Ilustración 9 Lote de transferencia en distintas máquinas cuando el tiempo $M1 > tiempoM2$ | 36 |
| Ilustración 10 Layout en taller del caso   | 39 |
| Ilustración 11 Marco de funciones de la etapa productiva                                   | 41 |
| Ilustración 12 Diagrama de Gantt de Ejemplo 1  | 63 |
| Ilustración 13 Diagrama de Gantt de Ejemplo 2  | 65 |
| Ilustración 14 Diagrama de Gantt para el modelo monoruta sin lote de transferencia         | 69 |
| Ilustración 15 Diagrama de Gantt para el modelo multiruta sin lote de transferencia        | 73 |
| Ilustración 16 Fenómeno de lote de transferencia   | 88 |

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

|   |    |
|---|----|
| Grafico 1 Evolución del Cmax                  | 95 |
| Grafico 2 Evolución de carga de máquinas      | 96 |
| Grafico 3 Evolución de la complejidad         | 98 |
| Grafico 4 Comparación de carga entre trabajos | 99 |

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En este Trabajo de Fin de Grado se van a plantear, estudiar y dar solución a una serie de casos de secuenciación dentro de un entorno de datos real. Ante todo se debe plantear el concepto de secuenciación, el cual es un proceso para la toma de decisiones que se centra en la asignación de recursos a tareas en periodos temporales dados y su meta es optimizar esa colocación en base a uno o varios objetivos dados [Pinedo, 2012]. Es por ello que la secuenciación se encuentra dentro del marco de la gestión de la producción en la parte operativa ya que lidiará de manera directa con las tareas que darán lugar a nuestros productos a producir.

La aplicación de la secuenciación no solo se queda en la actividad industrial, juega un rol importante en los campos de distribución y transporte, al igual que en empresas de servicios donde las tareas son fácilmente acotables a tiempos más o menos fijos.

En la secuenciación, la naturaleza de los recursos y tareas es bastante amplia, pueden ser máquinas, personal, vehículos de transporte y zonas de actividad por ejemplo. Mientras que en el caso de tareas pueden ser cualquier actividad o producto que puedan llevar a cabo cualquiera de los recursos que se definan.

El problema nace del el mero hecho de que todos estos recursos tienen una capacidad y una habilidad de procesado mientras que son muchas las tareas que dentro del sistema necesitan de uno o varios de esos recursos, en la mayoría de ocasiones en un orden determinado, para poder ser entregada al actor más determinante, el cliente. Entonces nace la pregunta, ¿En qué orden se dispondrán estas tareas? Para poder responder a esta pregunta es fundamental la definición objetivo u objetivos que definirán ese orden, ¿Queremos entregar a tiempo las tareas?, ¿Queremos que sea en el menor tiempo posible?, ¿Menor coste? Todo es posible en un problema de secuenciación.

Cuando el volumen de tareas y recursos es algo elevado, el uso de la secuenciación es determinante para asegurar la competitividad de una empresa, asegurando una reducción drástica de los costes y aumento de los recursos que se pueden ofrecer.

Centrándonos en este trabajo, como se ha comentado, la secuenciación no es más que una pieza del engranaje que forma la gestión y planificación de la producción y por ello es fundamental los flujos de información que provienen del resto de piezas que conforman el marco. En este proyecto se pondrá en práctica, ya que usaremos la salida de datos de un equilibrado de carga. Este equilibrado de carga de máquina fue realizado por un alumno de esta escuela del máster MOIGE, Arturo Romo de Vivar Reta, quién realizo su trabajo de Fin de Máster a lo largo del año 2015.

El entorno usado, un entorno real proveniente de una empresa en la que trabaja Arturo, situada en México y de

la que se hablará más detalle en secciones posteriores.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es por tanto ajustar la distribución de demanda proveniente de la carga de máquinas que propone el trabajo basado para un horizonte temporal semanal reservado para las máquinas. Es un taller de tipo Job Shop, término que explicaremos más adelante, 9 máquinas y 18 trabajos con sus rutas específicas para cada uno de ellos. El problema planteado tiene una carga alta de variables, datos y soluciones y es por ello que para introducir cada uno de los modelos que se verán a lo largo del proyecto serán acompañados por ejemplos de menor cabida donde se puedan mostrar el alcance con más detalle de cada modelo.

Para la consecución del objetivo se plantearán modelos de programación lineal con una serie de características:

- Modelos simples, con el menor número de restricciones y variables. Con el volumen de datos que se tiene, se debe de evitar ante todo variables con demasiadas dimensiones, lo que significaría tener grandes matrices de datos donde la información realmente útil está dispersa.
- Genérico para el entorno planteado. En cualquier planta productiva la demanda es variable y se necesita un modelo que pueda adaptarse fácilmente a la actividad variable semanal de la planta.
- Cuyos objetivos sean la reducción del máximo tiempo de finalización de todas las máquinas pero que a la vez tenga en cuenta todas aquellas operaciones que no pertenezcan a la cadena crítica del máximo, las cuales han de ser secuenciadas lo antes posible. Por lo tanto en cierta medida es un problema biobjetivo, concepto que será introducido en secciones posteriores.

En la literatura sobre secuenciación existen numerosos modelos de programación lineal que pueden cubrir las necesidades para este caso, pero para empresas de volumen medio-bajo como esta no se necesita un modelo que por tratar de ser genérico aumente su complejidad y con ello su reconfiguración y resolución. En este proyecto se han conseguido modelos livianos que generan información clara y simple.

La herramienta principal usada para resolver los modelos de programación lineal a lo largo del proyecto es LINGO en su versión 10, herramienta que tiene un lenguaje de programación propio. También parte de los modelos en especial los de menor cabida han sido representados mediante diagramas de Gantt y comprobados mediante algoritmos de heurística con LEKIN, programa muy útil y completo que permite introducir de manera fácil los resultados obtenidos con LINGO.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

*Sección 2.* En él se abordará todo el marco del concepto de secuenciación, comenzando por una introducción histórica que recorrerá sus inicios hasta lo que conocemos actualmente como secuenciación. Tras esto se

introducirán la notación y conceptos cruciales para trabajar y entender la secuenciación y elementos periféricos que aparecerán dentro de este trabajo.

**Sección 3.** De manera más precisa se formará un marco del estado del arte del problema de secuenciación que se va a abordar en este proyecto, el Job-shop y el lote de transferencia. Para ello se recorrerán los diferentes métodos de resolución del problema que han sido planteados en los últimos 70 años y su impacto en el problema.

**Sección 4.** En esta sección se describirá en detalle la situación del problema y el problema en sí que va a ser tratado. Se presentará la situación actual que atraviesa la empresa, una breve instrucción de la evolución de la misma, la distribución de las máquinas en taller y los planteamientos que se proponen para comenzar a resolver el problema.

**Sección 5.** Aquí se plantearán todo el conjunto de datos y modelos que compondrán la resolución del problema al completo. Los modelos serán clasificados por tipo de escenario planteado, al igual que las tablas de datos que nutrirán a estos modelos.

**Sección 6.** Se presentarán los resultados obtenidos tras resolver los modelos planteados en la sección anterior con el software de resolución. El análisis de los resultados de cada uno de los escenarios seguirá una estructura similar de cara a poder analizarlos a todos conjuntamente para poder determinar cuál de ellos es el ideal para dar solución al problema.

**Sección 7.** En él se presentarán las conclusiones generales acerca del proyecto, sus resultados y planteamientos para líneas futuras de trabajo.

**Sección 8.** Bibliografía citada en este proyecto.

**Sección 9.** Anexo de materia utilizada, separada en apartados.

# 2 LA SECUENCIACIÓN

---

Como ya se comentó anteriormente, la idea de secuenciación es un proceso de gestión donde el número de decisiones es considerable, las cuales son acometidas a lo largo de una frontera temporal de cara a asegurar la entrega de productos con la máxima calidad, mínimo coste y mínimo tiempo de utilización de los recursos. [Framiñan, Leister y Ruíz, 2014].

En esta sección del proyecto se introducirán los antecedentes, conceptos, notación y métodos de resolución.

## 2.1 ANTECEDENTES DE LA SECUENCIACIÓN

Aunque el ser humano lleve produciendo desde hace incontables años, no fue hasta el la mitad del S.XVII cuando la Primera Revolución Industrial creó los grandes núcleos de producción y es allí donde comenzaron los inicios de la secuenciación. Estas primeras fábricas eran simples y relativamente pequeñas, su principal afán era producir pequeñas familias de productos en grandes lotes. Las grandes mejoras venían de la utilización de piezas comunes a estas familias para eliminar puestos repetidos e infrautilizados.

La secuenciación tomaba un papel muy secundario, simplemente se disponían en base a su fecha de entrega y no se tenía constancia de una duración más o menos estándar de las operaciones individuales que necesitaba. [Roscoe, Freark y Irwin, 1971]. Limitados métodos de control del tiempo existían, por ejemplo Binsie (1887) describía que usaba un método parecido a un diagrama de Gantt rudimentario para controlar el avance de los lotes en taller.

A comienzos del siglo pasado todo cambió, las gamas de productos se diversificaron y la complejidad de operaciones aumentó considerablemente. La economía de escala se podía seguir conservando si se reducía la necesidad de máquinas en las plantas y para ello la integración entre departamentos debía de ser clave. Fue entonces cuando Frederick Taylor creó el concepto de *Production Control Office*, la cual tenía como objetivo crear planes de acción, controlar el inventario en planta y monitorizar operaciones.

Años después, uno de los padres de la secuenciación, Gantt (1916) comenzó a proponer ideas de cara a la mejora de la disposición de tareas en los recursos productivos, como por ejemplo dar a cada operador de máquinas un orden de trabajo al comienzo de su jornada para eliminar interferencias que puedan hacer perder la atención en su puesto y por tanto su productividad como activo en la cadena. Pero por lo que es realmente conocido hoy en día es por el diagrama que lleva su nombre, el diagrama de Gantt, “*el más pronto y mejor organizado tipo de diagrama de control para mostrar las relaciones entre lo planificado y lo realmente acontecido*” [Cox, 1992], el cual será introducido en secciones posteriores.

Otro de los actores fundamentales de cara al desarrollo de la secuenciación fue la invención y desarrollo de la investigación operativa. Las raíces de la investigación operativa nacen del intento constante de aplicar el método científico a la empresa y muchos son los estudios que afirman que esta corriente tiene comienzos en el año 1564, pero no fue hasta 1935 cuando se comenzó a usar el concepto pleno de la investigación operativa. El verdadero trabajo y aplicación de este campo comenzó en los preludios de la Segunda Guerra Mundial. Debido a los esfuerzos bélicos la asignación de recursos militares limitados a las distintas maniobras militares, los gobiernos instaron a sus científicos en aplicar sus conocimientos a la *investigación de operaciones*. Tras la guerra fueron muchos los equipos de científicos que vieron la utilidad de todo lo estudiado hacia ámbitos diferentes a los bélicos [Hillier, 2010].

Esta revolución de la investigación de operaciones vino de la mano de la programación lineal, que fue desarrollada en los años 40 y que pronto fue aplicada a problemas de producción, pero no directamente a la secuenciación. George Dantzig inventa el método simplex, útil y potente método para resolver la programación lineal de manera manual, que permitía simplificar la resolución de los modelos.

Tras esto, en los años 50 se comenzaron a desarrollar algoritmos orientados a la secuenciación como los de Johnson el SPT y el EDD relacionados con los tiempos de procesado y de entrega respectivamente para flowshops de dos máquinas, [Johnson,1954]. Destacan también entre ellos McNaughton, que en 1959 que consiguió resolver el problema de minimizar el tiempo total de procesos de trabajos interrumpibles en máquinas idénticas.

En la década de los 60 cuando la complejidad de los modelos aumentaba se desarrolló el método de resolución Branch-and-Bound, que es usada por la herramienta de resolución de modelos LINGO, en la cual se enumeraban todas las posibles soluciones que podía tener un problema y encontraba la óptima de todas ellas, pudiendo desechar un gran número de soluciones de manera anticipada con sencillos análisis de mejora de los objetivos marcados por el modelo.

Con la aparición de los ordenadores las posibilidades siguieron creciendo. Grandes modelos complejos eran resueltos de manera sencilla gracias a los primitivos ordenadores electrónicos digitales capaces de realizar un gran número de cálculos, resolviendo problemas hasta el momento imposibles.

Fue a finales de los años 70 cuando Garey y Johnson desarrollan la teoría de la complejidad computacional, que clasifica los problemas de acuerdo a su estructura y dificultad. Esto mediría la cantidad de recursos que necesita un modelo en concreto para ser solucionado. En función de esto se definen modelos polinomiales (P) y no polinomiales (NP) y dentro de los NP también hay un nivel más de complejidad, los NP-hard. Los primeros son los únicos que pueden ser resueltos en tiempos polinomiales. Por ejemplo si  $n$  son nuestras variables de decisión y el tiempo de resolución del modelo es  $25n^2 + n$ , entonces al ser una expresión polinómica sería factible su resolución en un tiempo polinómico, eso incluye las expresiones logarítmicas, lineales, cuadráticas, cúbicas etc. Cabe destacar que demostrar que un modelo sea de un tipo u otro es una tarea matemática no trivial.

Tras esto comenzaron a desarrollarse paquetes de software de resolución de modelos a mediados de los años 80,

dando acceso a estas técnicas antes solo disponibles para investigadores a los ciudadanos de a pie.

También cabe añadir otra clasificación planteada por [Pinedo, 2012] en la que los modelos de secuenciación pueden ser deterministas o estocásticos. Los modelos deterministas son aquellos en los que la salida del modelo está totalmente determinada por los valores de los datos introducidos en el modelo y las condiciones iniciales. En cambio los modelos estocásticos son aquellos que tienen en cuenta el componente aleatorio de sucesos, para una entrada de datos y de condiciones iniciales exactas la salida del modelo será diferente siempre que se resuelva el mismo. Es obvio que la naturaleza tiene un componente estocástico, pero estos modelos son considerablemente más complicados. Un modelo determinista puede aportarnos mucha información en el campo de la secuenciación ya que de primera mano podemos saber cuál debe ser la distribución y el orden de recursos y tareas óptimo, sería trabajo del campo del Control de la Producción el trabajar con la realidad y tomar decisiones a acerca de posibles desviaciones de la secuenciación original.

Como se explicó en la sección de introducción, la secuenciación forma parte de un marco de áreas dentro de la gestión y planificación de la producción en donde se distinguen por horizontes de peso en las decisiones, estratégico, táctico y operativo las cuales se orientan a decisiones a largo, medio y corto plazo respectivamente. En la ilustración siguiente se puede observar las funciones y campos de trabajo. [Framiñan, 2014].



|       |   |   |  |  |
|-------|---|---|--|--|
| Largo | -Programa de materiales<br>-Selección de proveedores<br>-Cooperaciones. | -Localización de plantas<br>-Sistema de producción                  | -Estructura física de la distribución                          | -Programa de producto<br>-Planificación estratégica de ventas. |
|       | -Planificación de personal<br>-MRP                                      | -Plan Maestro de Produc.<br>- Planif. de la capacidad               | -Planificación de la distribución                              | -Planificación de personal<br>-MRP                             |
|       | -Planificación de personal (Corto plazo)<br>-Petición de materiales     | -Lotificación<br><b>-Secuenciación</b><br>-Control de la producción | -Reaprovisionamiento de almacenes<br>-Planific. del transporte | -Planificación de personal<br>-MRP<br>-Contratos.              |
| Medio |   |   |  |  |
| Corto |   |   |  |  |

*Ilustración 1 Funciones del cuadro de la cadena de suministro*

En este esquema se puede apreciar el lugar que ocupa la secuenciación dentro del cuadro de mando, corto plazo y dentro de la etapa productiva. Los flujos de información entre bloques son constantes, pero de manera más intensa entre actividades que tienen que ver con su etapa en la cadena de suministro, en este caso la fabricación. Se puede observar que en el bloque superior de la secuenciación se encuentra la entrada de datos que tendrá el sistema, la planificación de la capacidad.

## 2.2 NOTACIÓN Y CONCEPTOS

De manera general en los problemas de secuenciación denotaremos al conjunto  $M_j (j= 1, \dots, m)$  como el conjunto de  $m$  máquinas que han de procesar  $n$  trabajos pertenecientes a el conjunto  $J_i (i = 1, \dots, n)$ .

Una secuenciación se realiza cuando un trabajo  $n$  es colocado en uno o varios intervalos de unidades temporales en una o varias máquinas,  $m$ . Un grupo de secuenciaciones pueden ser representadas de manera gráfica mediante un diagrama de Gantt, que pueden ser orientados a máquinas o a trabajos como se puede ver en las siguientes figuras [Brucker, 2007].

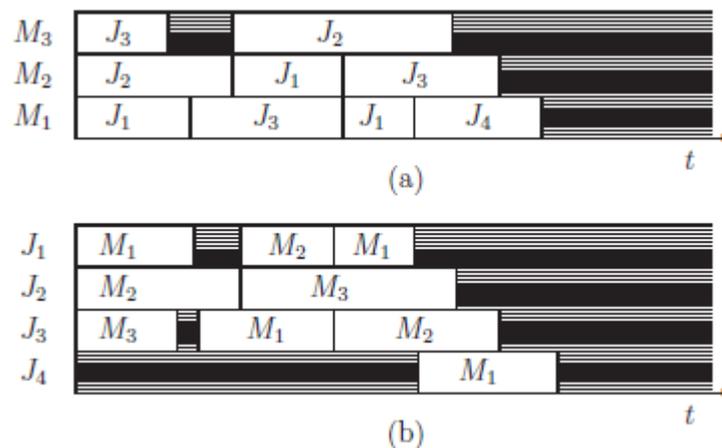


Ilustración 2 Diagramas de Gantt a) Orientación a máquinas b) Orientación a trabajos.

A su vez cada uno de los trabajos lo constan una serie de operaciones que necesitan de uno o varios recursos, siendo denominados como  $O_{ij}$ . En el resultado de la secuenciación obtendremos para cada una de estas operaciones la siguiente información:

- Tiempo de inicio (Start time)
  - $SO_{ij}$
- Tiempo de fin (End time)
  - $EO_{ij}$
- Ruta de procesado dentro de una máquina, que será un vector con tantos elementos como operaciones de los distintos trabajos pasen por ella.
  - $R_j$
- Tiempo de proceso de cada operación
  - $p_{ij}$ , si fuera independiente de la máquina que lo procesará;  $p_j$
  - Se verifica que  $p_{ij} \leq EO_{ij} - SO_{ij} \forall j \in N, \forall i \in M$ . El hecho de que esta expresión no se cumpla con signo de igualdad es debido a que aparte del tiempo de procesado puede haber otras actividades que acompañan a un lote o pieza que consuman tiempo.
- Tiempo de llegada al sistema

- $r_j$ , si fuera diferente para cada máquina;  $r_{ij}$
- Se cumple que el instante de inicio de una operación nunca será menor que su instante de llegada,  $r_j \leq SO_{ij} \forall j \in N, \forall i \in M$ .
- Fecha de entrega en la que un trabajo ha de ser terminado.
  - $d_j$ , instante en la que la última operación de un trabajo ha de ser terminada sin incurrir a penalización o coste.
  - $\bar{d}_j$ , fecha de entrega que no puede ser sobrepasada y por tanto es obligatoria. Se verifica que  $EO_{ij} \leq \bar{d}_j \forall j \in N, \forall i \in M$
- Prioridad de un trabajo, la cual afectará a la disposición de operaciones en una máquina, pero no será una prioridad absoluta, dependerá de la magnitud que se le otorgue.
  - $w_j$
- De igual manera es posible fijar la disponibilidad de una máquina de cara a un mantenimiento preventivo o inoperatividad.
  - $rm_i$  donde  $rm_i \leq SO_{ij} \forall j \in N, \forall i \in M$

De nuevo el autor [Pinedo, 1994] introduce una clasificación muy completa para los problemas de secuenciación dividida en tres campos,  $\alpha / \beta / \gamma$  propuesta por [Graham et al., 1979]. El primero de ellos describe el entorno de la máquina y solo contiene una entrada ya que solo puede haber un entorno posible por modelo. El segundo de ellos proporciona detalles del entorno de producción en forma de restricciones, pueden tener una, varias entradas o en ocasiones ninguna. Por último el describe el tipo de objetivo u objetivos que se ha fijado para resolver el problema. Las entradas son el número de esos elementos que se han usado para definir el problema. Otras clasificaciones han sido propuestas, como la de [Conway et al., 1967], A/ B/ C/ D donde A es el número de trabajos, B es el número de máquinas, C es el patrón de flujo que llevan las máquinas y por último D es la medida de rendimiento por la que la secuenciación está evaluada. Esta última es adecuada para problemas simples pero en el momento en que restricciones más complejas atañan al problema pierde sentido.

### 2.2.1 OBJETIVOS ( $\gamma$ )

Como ya se ha comentado, un problema de secuenciación debe tener uno o varios objetivo que determinen como se va a realizar la asignación de tareas y ordenes, a continuación se muestran los objetivos más comunes que se utilizan. También se ha de detallar si se buscará minimizar o maximizar ese o esos objetivos y que el valor que pueda alcanzar este acotado en un intervalo alcanzable para que el problema pueda tener fin.

Las medidas con las que se trabaja en los objetivos son las siguientes:

- $C_j$ ; Tiempo de terminación de un trabajo j.

- $F_j$ ; Tiempo de flujo de un trabajo  $j$ , o en otras palabras, es el tiempo en que el trabajo está en el sistema hasta que es terminado, teniendo solo sentido si tiene un tiempo de llegada diferente de cero.  $F_j = C_j - r_j$
- $L_j$ ; Retraso de un trabajo.  $L_j = C_j - d_j$
- $T_j$ ; Tardanza de un trabajo, para evitar valores negativos del mismo para casos de adelanto solo se cogen valores positivos de  $L_j$ .  $T_j = \max\{0, L_j\}$
- $E_j$ ; Adelanto del trabajo  $j$ , aquí se primarán valores negativos de  $L_j$ .  
 $E_j = \max\{0, -L_j\}$
- $U_j$ ; Condición de trabajo tardío, de carácter binario, que evaluará si un trabajo ha llegado tarde o no.  $U_j=1$  si  $T_j > 0$  y 0 si no.

Las funciones objetivo más comunes son las siguientes:

- $C_{max}$ ; Máximo tiempo de finalización. De todos los tiempos finales de finalización cogerá solo el máximo de todos ellos. Esta función objetivo solo intentará minimizar o maximizar el conjunto de operaciones que tengan relación con la operación que tiene su tiempo de terminación máximo y por tanto el resto las dejará libres.
- $\sum C_j$ ; Tiempo total de terminación, tiene un efecto en todos los tiempos de terminación, pero no será tan determinante a la hora de reducir los tiempos de terminación más altos. Tiene una variante con ponderaciones  $\sum(w_j C_j)$ .
- $\sum L_j$ ; Tiempo total de retraso, con ello se logra en la medida de lo posible reducir los retrasos de los trabajos. Tiene una variante con ponderaciones  $\sum(w_j L_j)$ . De manera relacionada se pueden formar funciones objetivos con la tardanza y el adelanto:
  - $\sum T_j$ ; Tiempo total de tardanza, o de manera ponderada  $\sum(w_j T_j)$
  - $\sum E_j$ ; Tiempo total de adelanto o su versión ponderada  $\sum(w_j E_j)$
- $\sum U_j$ ; Número total de trabajos tardíos, más restrictivos e indiferentes a cuanto sea su retraso. Tiene una versión ponderada  $\sum(w_j U_j)$ .

### 2.2.2 ENTORNOS ( $\alpha$ )

La disposición de los recursos es clave para abordar un problema de secuenciación, se definirá en primer lugar  $\alpha_1$  que definirá la disposición de las máquinas dentro de 7 tipos que ahora se introducirán y  $\alpha_2$  en el que se indican el número de máquinas que intervienen.

- Una sola máquina. Todos los trabajos tienen una sola operación, ya que han de procesarse en una sola máquina. Suele ser supuesto para usos teóricos o como una simplificación de modelos más complejos.

- Máquinas paralelas. Todos los trabajos siguen teniendo una operación, pero ahora en cambio tienen más de una sola máquina para ser procesada, mejorando el flujo de producción. Existen tres tipos:
  - Máquinas en paralelo idénticas (*Pm*). Aquellas en donde independientemente de la máquina que procese el trabajo, el tiempo de procesado será igual.
  - Máquinas en paralelo uniformes (*Qm*). Aquellas en la que la velocidad de procesado es diferente para cada máquina y con un valor,  $v_i$ . La relación que nos da el tiempo de procesado real que tiene la operación en función de la máquina escogida es  $p_{ij} = \frac{p_j}{v_i}$ .
  - Máquinas en paralelo no relacionadas (*Rm*). Caso más cercano a la realidad, las máquinas son totalmente diferentes y el tiempo de proceso de cada trabajo depende de la máquina en la que sea procesada sin ningún tipo de relación con las demás. Para presentar el conjunto de datos se necesita una matriz de tiempos de procesos  $p_{ij}$ .
- Flowshop (*Fm*). Son entornos en los que se dispone de un número de máquinas en serie por las que tendrán que pasar todos los trabajos y con la misma ruta de procesado para todos ellos. Al tener ahora una ruta definida deberán ser procesadas por cada una de las máquinas para pasar al siguiente buffer de su siguiente en la ruta. Un flowshop puede ser de permutación, lo que implica que dentro de cada máquina el orden de procesado de las operaciones ha de ser el mismo en todo ellos. Cada trabajo tendrá tantas operaciones como máquinas se encuentren en el entorno.
- Jobshop (*Jm*). A diferencia del anterior, cada trabajo tendrá una ruta diferente de procesado de sus operaciones. Se necesitará determinar la secuencia que siguen las operaciones de todos los trabajos dentro de cada máquina de cara a resolver el problema.
- Openshop (*Om*). En este caso no hay una ruta predeterminada que tenga asignada como dato sino que todos los trabajos pueden pasar por todas las máquinas, teniendo el problema la doble dificultad de hallar tanto la ruta de un trabajo como el orden de procesado en las máquinas.

### 2.2.3 RESTRICCIONES ( $\beta$ )

Por último están las restricciones, que ayudan a definir un modelo en función de ciertas características que tenga el sistema productivo en el que se sitúa.

- Suposición general  $\beta = \emptyset$ . Cuando no se tengan entradas en el campo de las restricciones, una serie de suposiciones se han de tener en cuenta:
  - Todos los trabajos y máquinas están disponibles al comienzo del horizonte de programación.
  - Los trabajos no se pueden interrumpir si alguna de sus operaciones está siendo procesada.

- Cada máquina puede hacer una operación en el mismo momento y cada trabajo solo puede ser procesado en una sola máquina.
- El buffer entre máquinas es infinito.
- El tiempo de transporte es despreciable.
- Secuencia de permutación  $\beta = pmu$ , como se comentó antes, es aquella que obliga a seguir el mismo orden de procesado en todas las máquinas por las que pasen los trabajos y por tanto todos los trabajos deben tener las mismas máquinas en su secuencia de procesado.
- Fechas de llegada y fechas de entrega
  - Las fechas de llegada pueden ser diferentes de 0;  $\beta = r_j$
  - Se crean limitaciones de entrega de los trabajos;  $\beta = d_j$  y  $\beta = \bar{d}_j$
- Precedencia de trabajos  $\beta = prec$ . Suele ir acompañado con un grafo en forma de árbol en donde se definen una serie de relaciones entre trabajos de manera que unos no se puedan hacer hasta que sus predecesores relacionados se hayan completado. Existen diversos tipos; *chains* (en serie), *intree* (todas los trabajos acaban precediendo a uno final), *outtree* (todos los trabajos provienen de uno inicial) y *tree* (no sigue ninguna pauta). Se muestra un ejemplo de  $\beta = outtree$

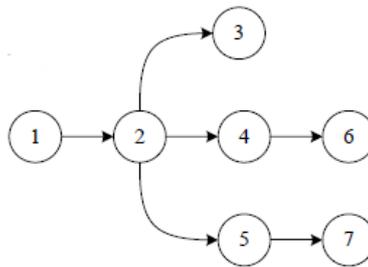


Ilustración 3. Esquema  $\beta = outtree$

- Tiempos de set-up  $\beta = setup$ . Cada trabajo tendrá un tiempo adicional en cada máquina necesario para prepararla para poder procesar el trabajo. Existen varias visiones para el tiempo de set-up:
  - Tiempos de cambio independientes de la secuencia  $\beta = S_{nsd}$ . Se necesitará crear una matriz  $s_{ij}$  donde cada trabajo tendrá un tiempo de setup en función de la máquina.
  - Tiempos de cambio dependientes de la secuencia  $\beta = S_{sd}$ . Se necesitará crear una matriz  $s_{ijk}$  donde cada trabajo tendrá un tiempo de setup para cada máquina para procesar un trabajo k después de procesar el trabajo j.
- Máquina no ociosa  $\beta = no - idle$ . Una vez que una máquina comience su secuencia de trabajos no podrá haber tiempos ociosos en ella entre trabajos.
- Lotes  $\beta = batch$ . Se utiliza para indicar que una máquina es capaz de procesar una serie de trabajos a la vez. Hay dos tipos:
  - Lotes en paralelo  $\beta = p - batch(b)$ . Indica que una máquina puede procesar un máximo de b trabajos a la vez, donde que el tiempo de terminación de cada tanda será el de más tiempo de procesado de los trabajos procesados en paralelo.

- Lotes en serie  $\beta = s - batch(b)$ . Indica que la máquina puede procesar en cadena un máximo de  $b$  trabajos cuyo tiempo de procesado es la suma de todos los individuales de los trabajos introducidos. Esta restricción es útil para casos de buffers limitados en las máquinas.
- Interrupciones  $\beta = pmtn$ . Define la condición en la que se queda una operación interrumpida en una máquina, necesaria si un modelo contempla la posibilidad de interrumpir trabajos para mejorar la solución. Existen las siguientes condiciones:
  - $\beta = pmtn - non - resumable$ , se pierde la operación del trabajo que quedó interrumpida.
  - $\beta = pmtn - semi - resumable$ , solo se pierde una cantidad determinada de la operación interrumpida.
  - $\beta = pmtn - resumable$ , no se pierde nada de progreso de procesado lo que lleva de operación al reiniciar de nuevo la tarea.
- Esperas de trabajos no permitidas  $\beta = nwt$ . Un trabajo una vez es iniciado necesita tener todas sus operaciones ejecutadas sin tiempos de espera entre ellas. Casos como en las fundiciones deben tener este tipo de restricción.
- Almacenamiento de máquinas  $\beta = buffer$ . Determina el límite de trabajos que pueden estar esperando a ser procesados en una máquina, si se sobrepasa este límite y no existe ningún almacén intermedio el trabajo se quedará esperando dentro de su máquina anterior en su ruta.
- Recirculación  $\beta = rcrc$ . Para casos en los que un trabajo tiene una máquina presente en su ruta más de una vez.
- Averías y mantenimiento  $\beta = brkdw$ . Necesario para casos en los que en ciertos periodos temporales el sistema pone inoperativa máquinas debido a averías y mantenimiento, no pudiendo procesar trabajos.

## 2.2.4 PROGRAMACIÓN MULTI OBJETIVO

En la secuenciación como se ha podido ver, existen diversos objetivos posibles por los cuales se pueden regir una secuencia, es por ello que se plantea la posibilidad en muchas ocasiones de usar dos objetivos. En ocasiones esos objetivos pueden ser contrapuestos y por ello no tener un óptimo común. Entonces dentro de la región de admisibilidad en la que están contempladas todas las soluciones posibles se creará una frontera en la que estarán todas las soluciones que no están dominadas por otras, a esta frontera se le denomina frontera de Pareto. [Narzisi, 2008]

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} = [x_1, x_2]^T \\ \text{Min } F_1(\mathbf{x}) = (x_1 - 3)^2 + (x_2 - 5)^2 \\ \quad F_2(\mathbf{x}) = (x_1 - 5)^2 + (x_2 - 7)^2 \\ \text{s.a. } g_1 = 90 - 10x_2 - 9x_1 \leq 0 \\ \quad g_2 = -9 + 3x_2 - 2x_1 \leq 0 \end{array} \right.$$

[Lozano, 2015]

Los métodos más comunes de resolución multiobjetivo son los siguientes:

- Suma Ponderada. Todas las funciones objetivo están sumadas acompañadas por un peso  $w_i$  que determinará la posición más cercana o lejana del máximo objetivo individual.
- Lexicográfico. Resuelve los diferentes problemas de optimización de manera individual. A medida que se van resolviendo se añaden como restricción para la siguiente función objetivo en la lista por orden de resolución.
- Restricción-elipson. Se resolverá el modelo con solo uno de los objetivos y se marcarán límites de alcance del resto de funciones objetivos, con valor  $\epsilon$ .

## 2.2.5 LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Ya se ha comentado la amplitud e impacto que tuvo la investigación operativa en la gestión de operaciones pero, ¿qué es la investigación operativa?

La intención inicial cuando se plantea un problema es conseguir una mejor solución posible y esa es la solución óptima. Es importante entender la idea de *una* solución óptima y no *la* solución óptima ya que son muchos los enfoques de solución que existen en la investigación operativa y por lo tanto muchas las interpretaciones de *la* solución óptima.

Según [Hillier, 2010] y como se ha comentado antes, la investigación operativa ante todo consiste en el uso del método científico para la resolución de problemas, puede ser conocida como *management science* también. El autor define una serie de pautas cruciales para poder definir, diseñar y crear un modelo de investigación operativa cuyo principal objetivo es ser lo más fiel a la realidad del problema, capaz de dar la mejor solución al tomador de decisiones en un canal que pueda ser entendido. Las pautas son las siguientes:

- Definición del problema de interés para su resolución y la búsqueda y recolección de todos los datos relevantes para ello. A pesar de lo que muchos creen, esta es la etapa más crítica para alcanzar la solución óptima deseada. Aquí se engloba a parte de los datos la selección, la elección de las funciones objetivos adecuadas, de restricciones, diferentes maneras de atacar la situación, límites de tiempo y número de veces que necesita esa solución ser obtenida, etc.

- Formulación del modelo matemático. Tras todo este conjunto de datos obtenidos toca reformularlo todo para que sea posible su análisis, en versiones idealizadas del problema. Cabe destacar que no tienen por qué ser matemáticos, pero se comentará únicamente acerca de ellos ya que son la base de la mayoría de los métodos de optimización. Todo modelo matemático como se ha comentado anteriormente necesita de sistemas de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas entre sí que consiguen parametrizar el problema, estas ecuaciones pueden ser lineales o no lineales. La optimización no lineal permite la multiplicación de las variables de decisión, que son aquellas que el modelo ha de otorgarle valor, lo supone un aumento de la complejidad considerable y es evitada por muchos autores. Por ejemplo, se han de tomar un conjunto de  $n$  decisiones que se desconocen de antemano, son cuantificables y todas tienen una relación común. A estas variables se les denomina variables de decisión  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Para poder conducir estas variables hasta la solución deseada necesitamos una expresión matemática que indique el grado de atractivo que tienen todas ellas, a esta expresión se le denomina función objetivo y es necesario acompañar con ella una meta de maximizar o minimizar esta expresión (*Min o Max*  $35x_1 + 65x_2$ ). Por otro lado es necesario plasmar de alguna manera las limitaciones que sufren estas variables de decisión, se definen las restricciones en forma de ecuaciones o desigualdades ( $x_1 + x_2, \leq 56$ ). Por último es necesario definir la naturaleza de cada una de las variables, que valores pueden tomar, continua, entera o binaria, por ejemplo.
  
- Obtención de soluciones a partir del modelo. El procedimiento de resolución de un modelo es clave para satisfacer las necesidades del tomador de decisiones, de nada sirve una solución óptima si llega tarde o una solución aproximada si no es cercana a la óptima. Actualmente la tarea de resolución es sencilla ya que existen a disposición de los analistas numerosos paquetes de optimización que utilizan algoritmos de resolución óptima como Branch-and-Bound. Pero el tiempo es crucial como se ha comentado y cuanto más realidad y extensión plasme el modelo antes se convertirá en NP-hard y su operatividad será reducida. En estos casos es importante que se siga la senda de conseguir un proceso de resolución óptimo pero no de *la* solución óptima. Es por ello que existen procedimientos heurísticos que explorarán el campo de soluciones de manera parcial en base a unos criterios lo más acertados posible, generando soluciones *subóptimas*. Se conocen como metaheurísticas al conjunto de procedimientos que aportan unas directrices y pautas ya estudiadas que ayudan a plantear y resolver soluciones. Principalmente estas metaheurísticas se dividen en poblacionales y de vecindad. Las primeras buscan formar “individuos” que son formados por diferentes valores de las variables de decisión del problema y como si de una población de fauna se tratara, se producirán cruces y selección natural hasta llegar a una convergencia de individuos que tengan grandes cualidades, esa medida de cualidad se le denomina *fitness* y puede tomarse como una función objetivo, una puntuación en base a unos criterios. Por el contrario las de población parten de un conjunto de variables de decisión y el algoritmo intentará

variar leve o de manera mayor alguna de las soluciones e ir comparando lo adecuada que es continuamente respecto a su anterior. Entre los más destacados se encuentran el algoritmo genético y *scatter search* para las poblacionales *simulated annealing* y *GRASP* para las de vecindad.

Es importante un análisis tras la solución, es muy difícil conseguir las soluciones enfocadas a un problema específico en la primera construcción-resolución, análisis *what-if* pueden ser útiles para llegar a un modelo adecuado.

Por último es crucial plasmar la idea del camino óptimo que se comentó posteriormente, una solución es buena u óptima para el modelo planteado pero siempre se puede modificar el mismo de cara a una mejora del contorno del modelo y ampliar el rango de soluciones posibles, a esto se le denomina análisis de sensibilidad.

- Prueba del modelo. Es muy importante el análisis de los datos para ver si son congruentes, lo más sencillo es realizar pequeños experimentos escalados con los reales para que puedan ser resueltos de manera manual y poder ver su correcto funcionamiento. [Hillier, 2010] describe un método llamado prueba retrospectiva, la cual se nutre de datos históricos y reconstruye el pasado para determinar si el modelo y su solución hubieran sido válidos en las situaciones pasadas.

Tras las pruebas, el analista se encuentra preparado para adaptar el modelo y su solución a su uso práctico, en otras palabras *un sistema de apoyo para las decisiones* [Hillier, 2010].

- La última fase sería la implementación del mismo, su evolución y su mantenimiento.

## 2.2.6 LA PROGRAMACIÓN LINEAL

Ya se han planteado muchas de las características que contiene un modelo de programación lineal, formada por una función objetivo que es maximizada o minimizada, restricciones que limitan ciertos valores de las variables de decisión y las relacionan entre sí. Pero como su nombre indica, la programación se basa en la relación lineal de sus variables de decisión. En su forma original las variables de decisión pueden tomar valores continuos positivos, siendo denotados como  $x_1 \geq 0$ . La continuidad en una variable puede trabajar bien con tiempos o materia de procesado líquida por ejemplo, pero ¿y si queremos utilizar una variable de decisión que solo tome valores binarios o una cantidad de materia prima que no es divisible más allá de la unidad? Para ello están las variantes de la programación lineal. [Strayer, 1989]

Si todas las variables de nuestro modelo de programación lineal fueran binarias, se denomina programación lineal binaria o por el contrario todas las variables de decisión fueran enteras se le denominaría programación lineal entera pura. La realidad es que muchos modelos mezclan los tipos de variables de decisión que se han comentado, a esta programación se le denomina lineal mixta entera.

El modelo genérico de programación mixta entera es el siguiente:

$$\min c^T x$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

$$x_i \in Z \forall i \in I$$

Añadir variables de decisión enteras aumenta la complejidad del problema considerablemente pero a su vez aporta un poder al modelo que en su variante básica no se consigue. Es por ello que la programación mixta entera no es resoluble en un tiempo polinomial y por tanto es NP, incluso pequeños problemas son difíciles de resolver. Actualmente no se conoce ningún algoritmo que pueda resolver en un tiempo polinomial este tipo de problemas. Una manera buena forma de atacar el problema es con la relajación lagrangiana. [Larrosa, Oliveras y Rodríguez-Carbonell, 2015], [Ferguson, 1996].

# 3 SECUENCIACIÓN DE TAREAS EN JOBSHOP: ESTADO DEL ARTE

---

Esta sección buscará formar un marco completo de la idea de la secuenciación de tareas en talleres tipo Jobshop y de manera adicional el estado del estudio del lote de transferencia. Se realizará una revisión de la literatura acerca del problema de la secuenciación, autores y sus obras.

## 3.1 LA SECUENCIACIÓN (SCHEDULING)

Ya se ha definido con anterioridad el concepto de secuenciación y su posición en el marco de la planificación de la producción pero merece la pena realizar un análisis más profundo de este campo.

La tendencia del mercado actual necesita variedad, vida de productos corta y presión competitiva para una reducción constante de costes de producción, siendo determinante los sistemas de cero inventarios. Sin embargo para mantener la cadena de suministro y el apetito del mercado se necesita una rápida respuesta a pedidos de producción y a su vez más stock para ser mantenido. Estos requisitos contrapuestos demandan una secuenciación eficiente, efectiva y precisa, la cual se torna bastante compleja incluso en los más simples entornos de producción. La secuenciación es en esencia resuelta con un Problema de Optimización con Restricciones (*COP*, según sus siglas en inglés) que en el entorno de la fabricación significa encontrar la secuencia de colocación de trabajos,  $\pi_j$  en cada uno de los recursos que optimicen una función objetivo. [Jain & Meeran, 1998]

## 3.2 EL JOBSHOP

JSSP, *Job Shop Scheduling Problem*, es el problema más general de todos en el ámbito productivo en la clasificación de entornos que existe, no existen restricciones en las máquinas de procesado en relación con las tareas, y las rutas alternativas para tareas pueden estar permitidas. [Graves, 1981] El autor cuando nos habla de las rutas alternativas para los trabajos se refiere a una de las variantes del Jobshop, *Flexible Jobshop* donde ciertas operaciones de un trabajo pueden ser realizadas en diferentes máquinas, aumentando el flujo de material y la reducción de tiempos. Este trabajo trabaja con rutas alternativas pero los modelos no elegirán como distribuir las operaciones en máquinas disponibles y válidas ya que ese trabajo se realizó en el equilibrado de carga de máquinas como se verá en capítulos posteriores.

Es difícil averiguar quiénes fueron los primeros autores en trabajar con el *Jobshop*. Se conoce que [Roy and Sussmann, 1964] fueron los que propusieron el primer grafo enumerativo basado en un grafo disyuntivo que se

muestra en la figura:

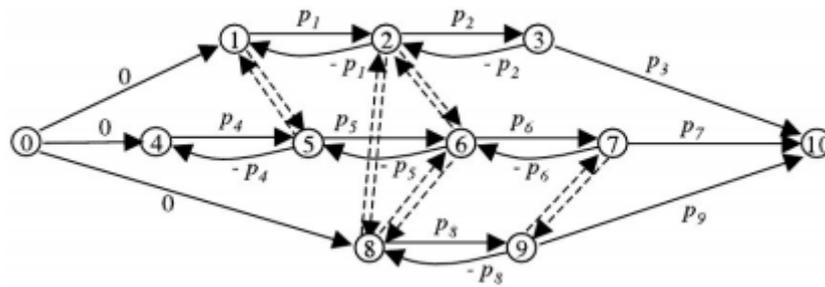


Ilustración 4 Grafo de Jobshop

Años después en 1969 fue Balas quien aplicó la primera aproximación enumerativa del Jobshop basado en los grafos desarrollados por los autores anteriormente citados. Sin embargo hay literatura anterior a cerca del Jobshop, Thompson (1960) propuso una plantilla con una regla de prioridad para talleres con características similares al Jobshop, [Jackson, 1956] generalizó el algoritmo que Johnson creó en 1954 para Flowshop hacia el Jobshop y [Akers and Friedman, 1955] aplicaron algebra booleana para hacer una aproximación de representación de secuencias. El objetivo de todos estos trabajos era romper con la idea de Flowshop y plantear la posibilidad de haber diferentes secuencias entre las máquinas y conseguir que todos los trabajos fueran procesados lo antes posibles. Incluso algunos de estos autores citan a otros que trataron esta idea antes.

De las funciones objetivo incluidas en la sección anterior sin duda alguna  $C_{max}$  ha sido la más usada en la literatura. Fue la primera aplicada por los investigadores a principios de la década de los 50 a los primitivos problemas simples, gracias a su facilidad de análisis desde el punto de vista matemático y su fácil formulación. Es por ello que ha sido foco de estudios académicos hasta ahora siendo determinante para determinar y cuantificar la dificultad computacional de los modelos. [Demirkol et al., 1997] elaboró estudios acerca de esta función objetivo donde indica que en relación a otros objetivos como  $\sum Ci$ ,  $\sum Ti$  y  $Lmax$ , tienen un desempeño mejor de media para la obtención de secuencias.

Se conoce que un problema con un tamaño de  $n$  recursos por ruta y  $m$  trabajos en su secuencia  $\pi_j$  tiene una cota superior de  $(n!)^m$  soluciones, para poder hacerse una idea en un problema de 4 elementos por ruta y 20 trabajos habría un total de  $4,019988718 \times 10^{27}$  posibles soluciones. Explorar todas y cada una de estas posibles soluciones no es práctico y no resoluble en un tiempo polinomial, es NP-Hard. La determinación de su complejidad fue desarrollada por [Cook, 1971; Garey et al. 1976].

Aquí un algoritmo óptimo requeriría un numero de iteraciones computacionales que crezcan exponencialmente con las entradas y la creencia general es que no existirá nunca un algoritmo que pueda nunca encontrar una solución para este tipo de problemas *hard*. Incluso los casos más especiales de dimensiones de  $\pi_j$  se convierten en NP-Hard, lo que convierte a este tipo de problemas uno de los más fastidiosos de su clase [Nakano y Yamada, 1991; Lawyer et al. 1993; Jain y Meeran, 1998]

A pesar de haber encontrado estrategias de resolución para otros problemas de tónica NP-Hard como el

aleatoriamente generado *Travelling Salesman* con más de 4000 ciudades, no hay evidencias que confirmen que para  $\pi_j$  de más de  $20 \times 10$  (nxm) se puedan encontrar soluciones óptimas. [Mattfeld et al.1998]

La principal estrategia enumerativa que da resultados óptimos es Branch-and-Bound, anteriormente citada, que describe todas las soluciones en forma de árbol y que gracias a su técnica se pueden desechar ramas completas del mismo, evadiendo un gran número de soluciones.

En la figura siguiente se muestra un árbol de soluciones de un ejemplo pequeño de secuencias posibles en Branch-and-Bound con sus valores de función objetivo correspondientes. Si por alguna de las ramas de este árbol se alcanza una puntuación mayor a cualquiera de las soluciones ya alcanzadas, el algoritmo dejará de buscar ya que sabe que no conseguirá mejoras. Cabe destacar que aunque este método es adecuado para instancias donde  $N < 250$ , su excesivo tiempo de computación le deja fuera de ciertos problemas de interés y su rendimiento es muy sensible para instancias individuales y para valores superiores de cotas [Lawler et al. 1993].

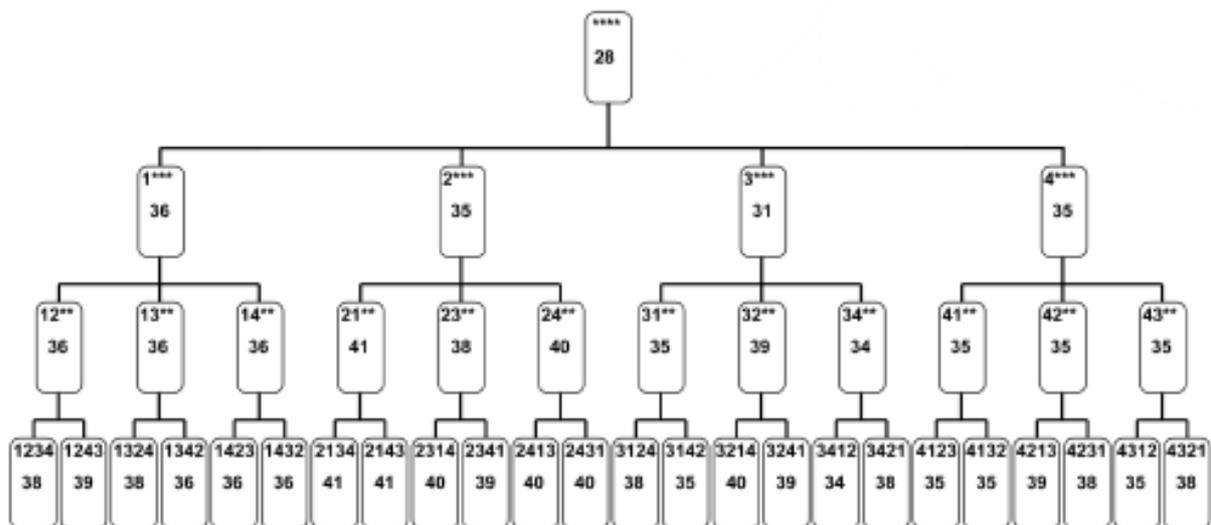


Ilustración 5 Diagrama de árbol de B&B [Fernandez-Viagas, 2015]

En las décadas de los 70 y 80 los investigadores estuvieron muy centrados en averiguar la complejidad de los modelos de scheduling desarrollados en las décadas anteriores. Todos ellos coincidían con la dificultad que tenían los problemas  $\pi_j$ . Y es por ello que se comenzó a trabajar con las heurísticas, que ya se han introducido anteriormente, para poder trabajar con problemas más complejos.

Las primeras fueron las reglas de despacho, *dispatching rules*, las cuales básicamente asignan prioridad a las operaciones en función de una serie de criterios, en algunos casos consiguen grandes resultados. Destacan las desarrolladas por [Grabot & Geneste,1994], la cual usa la técnica de lógica *fuzzy* en la cual trata de ajustarse a la condición multicriterio que tiene un entorno Jobshop, para ello crea reglas de despacho agregadas para lograr compromiso entre los diferentes criterios y de mano de [Dorndorf & Pesch, 1995] con una búsqueda local genética mezcla este recurso. El principal problema de las reglas de despacho es su capacidad, las soluciones se degradan a medida que aumenta su tamaño.

Por otro lado las heurísticas suplen ese problema y han sabido adaptarse muy bien a los problemas de Jobshop. Uno de los más destacados es el *Shifted Bottleneck* [Adams, Balas & Zawack, 1988], el cual realiza una relajación del problema de  $m$  máquinas a diferentes máquinas individuales, todas son evaluadas por su puntuación de función objetivo y la que tenga mejor cota inferior es la elegida en esa iteración para ser secuenciada.

El algoritmo de intersección de [Werner & Winkler, 1995] que se realiza en dos pasos; el primero aplica una estrategia constructiva en la cual una operación es colocada una secuencia de una máquina de manera que minimice la duración del camino más largo de todas ellas. La segunda una vez formada la secuencia en máquina prueba inserciones aleatorias para ver si mejoran.

Técnicas de satisfacción de restricciones [Caseau & Laburthe, 1995] son un conjunto de técnicas iterativas de aproximación las cuales aplican muchas de las reglas y estrategias usadas en Branch-and-Bound. Su objetivo principal es reducir más aún el espacio de soluciones imponiendo una serie de restricciones que restringen el orden por el cual las variables son seleccionadas y la secuencia en la que valores posibles son asignados a cada variable.

Métodos basados en la búsqueda local también son bastante comunes tales como *GRASP* donde con diferentes casuísticas de aceptación de espacios de búsqueda se buscan mejoras. [Resende, 1997]. Pero el criterio de aceptación más trabajado hasta ahora es el *simulated annealing* gracias a su condición estocástica. Entre los autores que comenzaron a utilizarlo están [Yamada and Nakano 1996] usándolos en búsqueda por vecindad críticas con secuenciaciones activas y [Kolonco, 1998] como medida de fitness en algoritmos genéticos.

También hay numerosos trabajos a cerca de la Búsqueda Local Genética (*GLS*) la cual usa a las secuencias hijo nacidas del *crossover* como inicio de búsquedas locales. Usadas por [Mattfeld 1996]

La Búsqueda Tabú sugerida por [Glover, 1977] y terminada de perfeccionar en 1990 es muy utilizada también, está orientada a desechar soluciones que considera que duplican o se asemejan a soluciones ya alcanzadas. Destacan los estudios realizados por [Nowicki & Smutnicki, 1996]

Ya en el campo enumerativo, el que atañe a este trabajo, se encuentra diversa literatura. Fueron pioneros en formular modelos de programación mixta entera para Job-shop [Mann, 1960; Giffer & Tompson, 1960; Balas, 1978]. Aunque cabe destacar que esta formulación ha sido muy discutida ya que no había estado consiguiendo buenas aproximaciones respecto a los métodos de solución “prácticos” por los propios [Giffer & Tompson, 1960] y autores posteriores. Pero aun así, interesantes modelos han sido propuestos como el de [Harjunkoski et al. 2000] en el que de manera híbrida se combina la programación mixta con la programación lógica de restricciones con buenos resultados.

De mano del Branch-and-Bound también se han presentado diversas ideas, [Mahon & Florian, 1975] desarrollaron una metodología para manejar fechas de entrega y tardanzas máximas en JSSP. [Asano & Ohta, 2002] propusieron la diversas heurísticas que usaba el B&B de cara a encontrar una solución óptima.

Como conclusión se debe matizar que las aproximaciones matemáticas resultan muy atractivas mientras se pueda plasmar de manera adecuada en el modelo la abstracción, pero a la hora de comenzar la etapa de resolución y búsqueda de la solución óptima se complica de manera sustancial al igual que el tiempo de resolución necesario. Desde que el problema de JSSP ha aumentado en dificultad en los últimos años, la optimización matemática se ha quedado en un segundo plano debido a su gran limitación. [Noor, 2007].

Como resumen del estado del arte que se ha llevado a cabo podemos ver este esquema donde están recogidos todos los métodos de resolución habitualmente explorados por los autores de JSSP.

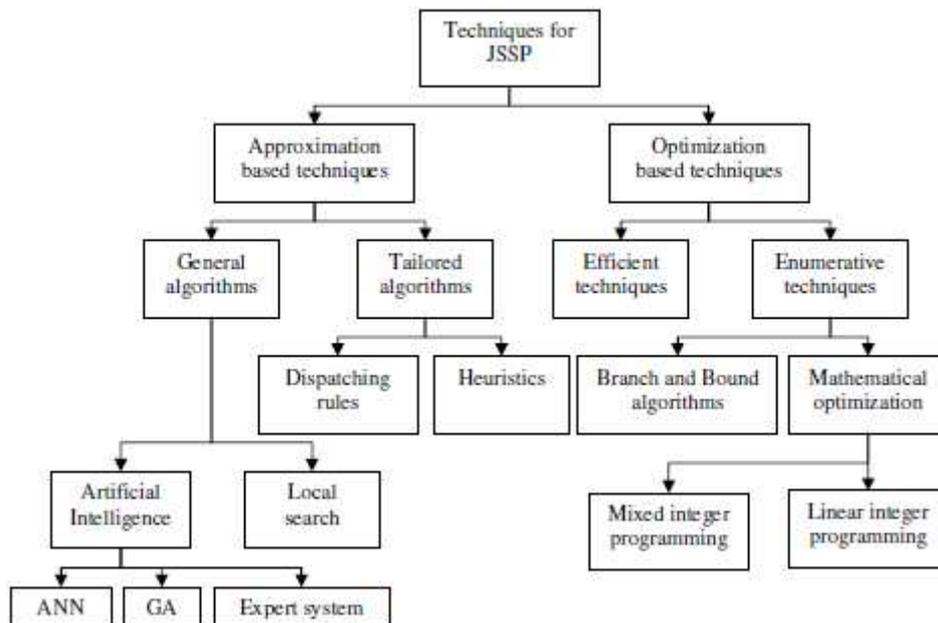


Ilustración 6 Marco de técnicas de resolución de Job-shop [Jain and Meeran, 1998]

### 3.3 LOTE DE TRANSFERENCIA (TRANSFER LOTS)

Como parte de los conceptos implantados en este proyecto, se ha de introducir el lote de transferencia. La idea de lote como bloque de piezas siempre transportadas y procesadas juntas pierde sentido cada vez más hoy en día con los avances en el método de transporte, permitiendo un flujo continuo de piezas entre las máquinas por las que necesitan pasar. Lo que significa que un tipo de pieza pueda comenzarse a realizar en paralelo la operación precedente.

Por ejemplo, un lote que lo componen 30 piezas comienza a ser procesado en la primera máquina de su secuencia de procesado. Si se tiene un sistema de flujo continuo de transporte de piezas (p.e una cinta de transporte) en el momento que el operario termina la primera pieza en su máquina podría poner en transporte la misma para que pudiera ser procesada o puesta en cola de la siguiente máquina en su secuencia de procesado de cara a poder minimizar esperas de lote completo o máquinas ociosas.

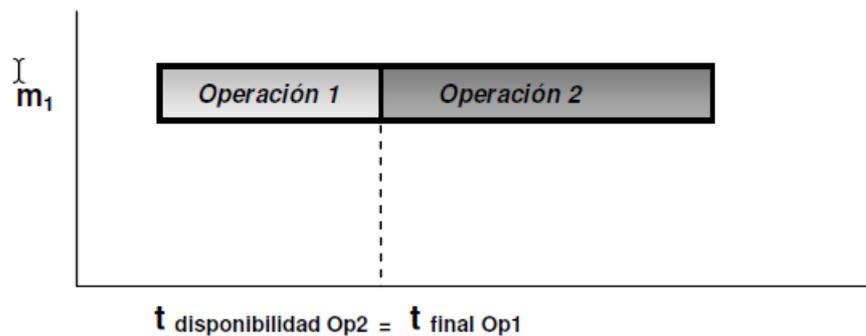
Un lote de transferencia no tiene porqué ser unitario, pieza a pieza sino que como si de un *trigger* se tratara

cuando hubiera  $n$  piezas ya procesadas se comenzara su transporte a la siguiente máquina. La razón por la que el transporte se realice lejos de un valor unitario es debido a que en entornos como el ya introducido Job-shop, un sistema de transporte para que fuera efectivo debería adaptarse a cada ruta de cada pieza, lo que incurriría a una cinta personalizada para la misma, cosa difícil. Para entornos donde los sistemas de transporte con un recurso que se moviliza (p.e carretilla tripulada) es más adecuado hacer un estudio previo al modelo donde se determine la cantidad efectiva de lote de transferencia necesaria para cada tipo de pieza.

A efectos de la secuenciación, el tamaño del lote solo es determinante en la primera transferencia, que es la que predetermina el inicio del procesado de la siguiente operación en la segunda máquina. Por este motivo es adecuado un tamaño de lote pequeño, para adelantar lo antes posible el procesado de la operación siguiente.

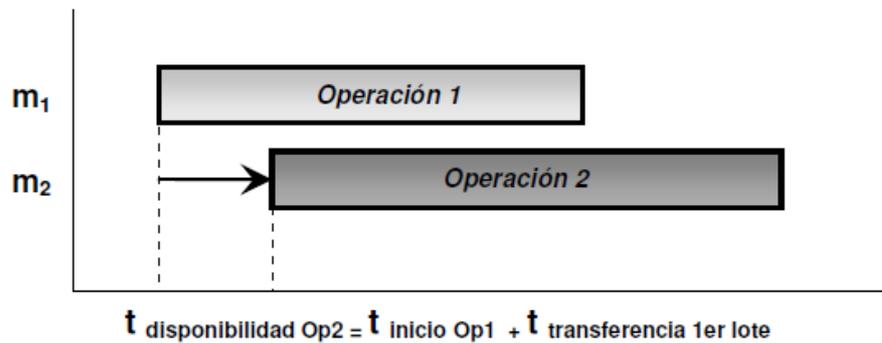
Existen tres casos posibles de transferencia entre máquinas, los cuales determinan el instante de disponibilidad de la siguiente operación, tal como se introduce a continuación:

- Transferencia en una misma máquina, para casos en los que la siguiente operación de una pieza ha de hacerse en una misma máquina. En este caso el lote de transferencia sería del mismo tamaño que el lote completo ya que no existen tiempos ociosos para comenzar el lote.



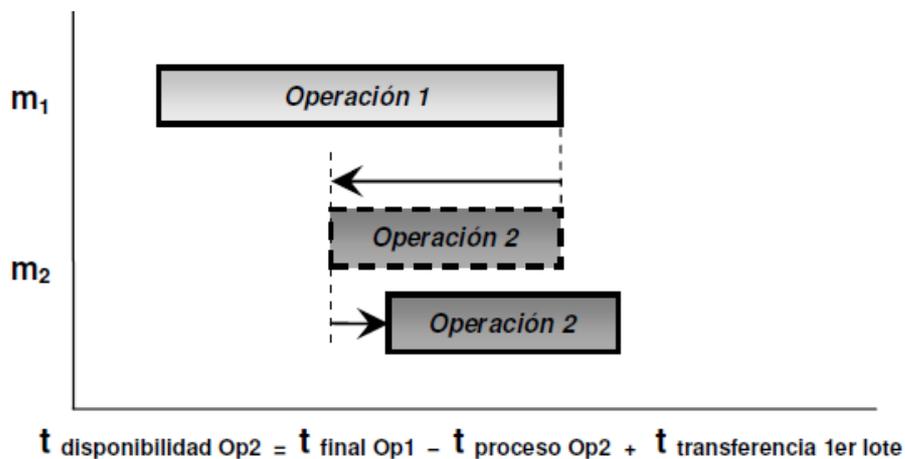
*Ilustración 7 Lote de transferencia en una misma máquina.*

- Transferencia entre máquinas diferentes donde el tiempo de procesado de la segunda operación es mayor que la de su predecesora. En este caso la segunda máquina empezará a trabajar en cuanto las  $n$  piezas de transferencia lleguen a ella. En estos casos el flujo de trabajo entre máquinas será continuo ya que el lote de transferencia de  $n$  piezas tarda menos en ser procesado en la primera máquina por lo que cuando la máquina 2 acabe uno de los lotes de  $n$  piezas ya estará en cola el siguiente.



*Ilustración 8 Lote de transferencia en distintas máquinas cuando el tiempo  $M1 < tiempoM2$*

- Transferencia entre máquinas distintas donde el tiempo de procesamiento de la segunda operación es menor que la de su predecesora. En este caso la máquina  $m_2$  procesa más rápido las  $n$  piezas transferidas y por ello deberá esperar a que la máquina  $m_1$  le transfiera de nuevo otra tanda de  $n$  piezas procesadas, creando indeseables instantes de tiempo muerto entre llegadas. Para evitar este fenómeno se debe calcular el instante de finalización de la operación 1 y a ese tiempo se le resta el tiempo de procesamiento de la segunda operación, que está representada como la flecha hacia la izquierda en la siguiente ilustración y se le añade el tiempo de procesamiento de las  $n$  piezas que constan el lote de transferencia que es representado con la flecha derecha.



*Ilustración 9 Lote de transferencia en distintas máquinas cuando el tiempo  $M1 > tiempoM2$*

Los lotes de transferencias son útiles cuando un trabajo ha de hacerse para grandes lotes de piezas, suponiendo grandes tiempos de proceso para cada operación en las máquinas y lotes con grandes tiempos de set-up. En la mayoría de los casos esto origina grandes tiempos muertos entre operaciones en las máquinas y por tanto costes y pérdida de conjunto de soluciones.

Aplicaciones del lote de transferencia ayudan a que grandes lotes se procesen a la misma vez en diferentes centros de procesamiento, esto acelera la producción en taller, reduce el inventario Work-In-Progress, el cual es aquel que está en movimiento por el taller y a pie de máquina a la espera de ser procesado, y la entrega del productos [Wagner & Ragatz, 1994].

Los primeros autores que trabajaron con la disgregación de lotes fueron [Jacobs & Bragg, 1988] donde mediante una regla de despacho se decidía el tamaño del lote de transferencia. También destaca el trabajo de [Vickson & Alfredsson, 1992], los cuales trabajaron con Flowshops de tres y dos máquinas y grupos de transferencias de igual tamaño.

# 4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

---

En este capítulo se abordará la descripción concisa del problema la secuenciación de tareas en un taller distribuido tipo Job-shop en un horizonte semanal. En primer lugar se describirá brevemente la empresa, el producto objetivo, recursos productivos y procesos. Y por último se centrará en la metodología que se va a usar para resolver el problema, incluyendo el marco de datos provenientes de la carga de máquinas del que se va a nutrir el problema.

## 4.1 DESCRIPCIÓN

Fábrica Nacional de Herramientas S.A., *FANDHER* según sus siglas, es una empresa de origen familiar asentada en Aguascalientes, México y fundada en el año 1995.

En sus primeros años, con un taller pequeño y tan solo 4 operarios comenzaron a fabricar Buriles Calzados mediante únicamente tornos. También, poco después, se dedicaron a la fabricación de brocas usadas en la colocación y mantenimiento de las vías del ferrocarril.

Pero fue en 1997 cuando comenzaron a fabricar el producto en el que se basa este trabajo, los electrodos para soldaduras de resistencia a partir de aleaciones de cobre.

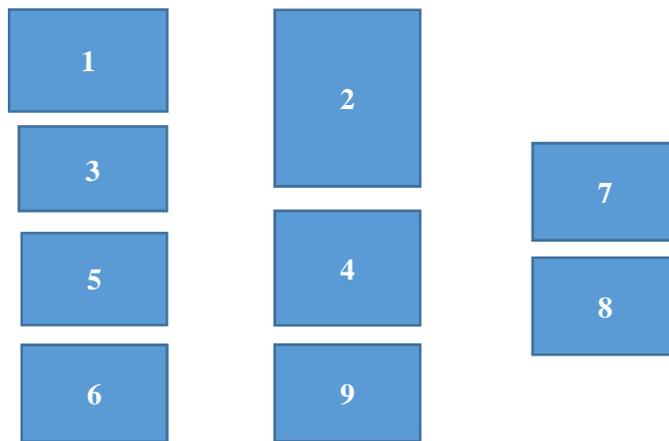
Los electrodos actualmente se encuentran en una línea de producción dedicada, aunque comparten parte de la maquinaria con la línea de brocas.

La línea de producción dedicada para electrodos la constan un total de 9 máquinas distribuidas de manera paralela, cuyo objetivo es reducir las distancias recorridas por personal y piezas procesadas entre estaciones de trabajo, formadas por una máquina individual.

Las máquinas son las siguientes:

- Centro de maquinado HAAS. (1)
- Centro de maquinado FCL 820. (2)
- Fresadora PROTOTRACK, con control numérico computarizado. (3)
- Torno PROTOTRACK, con control numérico computarizado. (4)
- Fresadora Saturno I, de tipo manual. (5)
- Fresadora Saturno II, con control numérico computarizado. (6)
- Torno Haringer de boquillas. (7)
- Torno McLane. (8)
- Rectificadora B&S, para el mecanizado por abrasión. (9)

El layout del taller es el siguiente:



*Ilustración 10 Layout en taller del caso*

Respecto al personal, la línea tiene un total de 10 personas operando en ella. 9 de ellos son operadores de máquinas y otro que trabaja tanto como operador y como responsable de línea. Los propios empleados son los encargados del transporte de los lotes o piezas tras ser acabados de procesar en su máquina.

El flujo productivo de un tipo de pieza comienza con la llegada de una orden de compra por parte del cliente al sistema ERP. Tras esto se realiza un *Bill to Materials* para comprobar la viabilidad de materiales que se van a necesitar para cubrir la partida de piezas pedida por el cliente. Si la operación es viable el departamento de almacén lanzará la orden de trabajo, en caso contrario se quedará retenida. Una de esas órdenes corresponderá al departamento de producción, dando inicio a la planificación y programación de la producción.

En el proceso no solo estarán las piezas pertenecientes al pedido de un cliente sino que como se ha comentado antes es un horizonte semanal y puede haber otras partidas que hayan sido pedidas durante ese periodo o a la espera de hace más tiempo. Las diferentes partidas son distribuidas en función de las llegadas de las mismas o de su criticidad. El departamento de producción debe hacer primero de todo la carga de máquinas, problema que fue tratado por [Romo de Vivar, 2015] donde se distribuirá cada uno de los lotes en las diversas rutas posibles. Tras esto se necesitará programar la producción, donde la decisión será determinar el orden de entrada de los trabajos en todas sus máquinas.

La problemática proviene de tener muchas órdenes, pocas piezas, diferentes rutas y tiempos para cada producto hace que saber de forma manual cual es la mejor secuenciación de las operaciones sea muy difícil.

Hay que añadirle también la necesidad de realizar *set-ups* al comienzo de cada lote que se ha de realizar de manera manual y por lo tanto retrasa el comienzo del procesado de los lotes en las máquinas.

En ciertas ocasiones se realizan ciertas modificaciones en los pedidos de los clientes, permitidos por política de empresa hasta la semana de comienzo de procesado del producto por lo que la secuenciación ha de ser fácilmente modificable y rápida de determinar.

Todo esto se ha realizado a lo largo de los años sin ningún soporte técnico, a base de programas de básicos de

ofimática y ensayo y error, originando pérdidas considerables. Estas malas prácticas se traducen en máquinas y operarios con trabajos discontinuos en donde operaciones se quedarán en cola sobrepasando buffers y estresando al operario mientras que otros centros de trabajo estarán desocupados, las fronteras semanales son difícilmente respetadas ya que la aleatoriedad de los órdenes en máquina hacen que no se pueda controlar el fin de todos los trabajos programados. Una solución empleada ha sido reducir las capacidades semanales de procesado, lo que les hace perder capacidad competitiva y fidelidad de los clientes.

Dentro del banco de datos que se necesita para plantear el problema de secuenciación para este caso de estudio se encuentra en gran parte de los que resulta el modelo propuesto por [Romo de Vivar, 2015] de equilibrado de carga de máquinas y selección de pedidos como se verá en el apartado siguiente. Datos como la demanda y número de pedidos en el horizonte semanal serán entradas de los modelos y como dato de referencia usaremos la carga máxima en minutos de cada centro de trabajo propuesta por el autor, el cual no debería ser sobrepasado por las secuencias resultados.

Los modelos propuestos para resolver el problema son de programación matemática, más en concreto de programación lineal mixta entera y serán resueltos mediante el software propuesto en la sección de introducción. Por parte de la empresa se requieren plantear y resolver diversas configuraciones y caminos para abordar el problema, es por ello que se plantearán diversos escenarios perfectamente viables para la situación real.

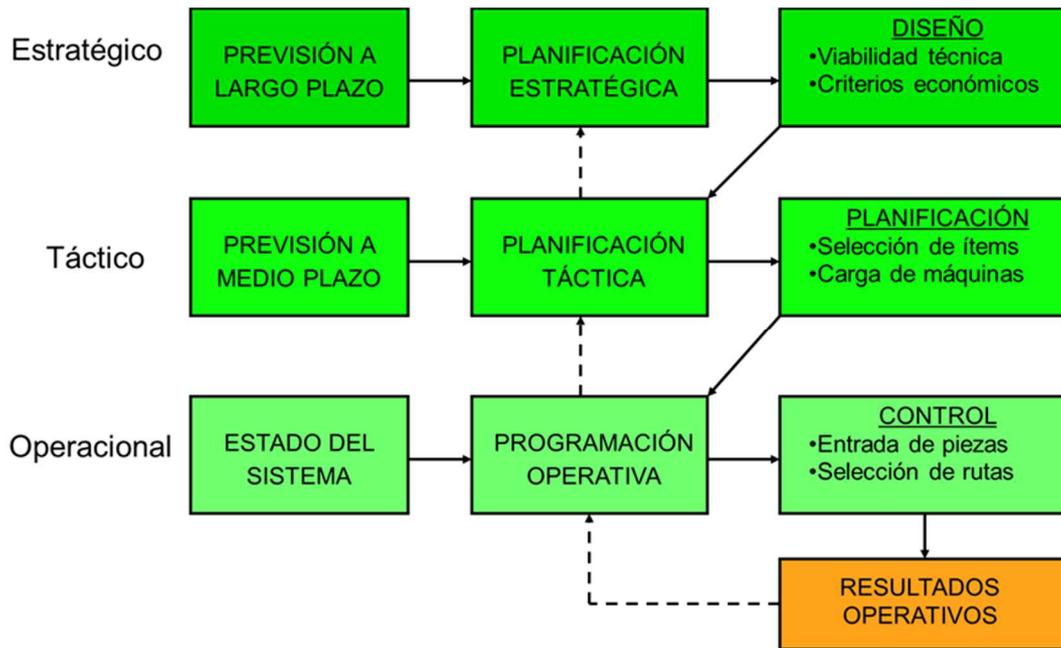
El tamaño medio de los lotes, los tamaños reducidos de las piezas y la cercanía de las máquinas hacen que se pueda plantear una lotificación diferente a la que siempre había existido, el lote de transferencia.

## **4.2 PUNTO DE PARTIDA: CARGA DE MÁQUINAS.**

Como se ha mencionado anteriormente, en este Trabajo de Fin de Grado se va a realizar una programación de operaciones (secuenciación) de una planificación táctica, la carga de máquinas obtenida en el Trabajo de Fin de Máster de Arturo Romo de Vivar Reta.

Dentro del marco de la cadena de suministro ya introducido en la sección de introducción, merece la pena realizar un análisis más profundo de la cadena de decisión y funciones de la etapa de fabricación, que es la que atañe a ambos trabajos. En la siguiente ilustración se puede apreciar las características disgregadas en ámbitos de previsión, planificación y función.

En primer lugar cabe destacar que en la fabricación es crucial tomar la idea de que las decisiones de tipo estratégico y táctico deben buscar diseñar y planificar el sistema productivo a la perfección para que cuando todo el sistema comience, nada falle y de ello proviene que sean planificaciones de algo aún no ocurrido, con



*Ilustración 11 Marco de funciones de la etapa productiva*

márgenes de tiempo suficientemente amplios en función del tipo de decisión.

Durante la planificación estratégica se han de cubrir aspectos a muy largo plazo, tales como la viabilidad técnica de la maquinaria que se está usando de cara a rendimiento y extensión de nueva oferta y por supuesto la viabilidad en términos económicos de todas esas decisiones que se van a tomar, donde se podrá anteponer el impacto monetario de todas ellas una vez sean aplicadas, este tipo de decisiones no suelen ver resultados hasta un largo periodo de tiempo y de ahí su necesidad de analizarlas en profundidad.

La planificación táctica sigue un ciclo de decisión más corto que la anterior, normalmente por cada ciclo productivo ha de tomarse de manera repetida. Las decisiones a tomar se dividen en dos, las que atañan a la selección de ítems, el cual se encarga de escoger que cantidad de la demanda de ítems o productos van a incluirse en el ciclo de producción y cuáles no. En segundo lugar están aquéllas que conciernen a la carga de máquinas, dentro de un ciclo de fabricación los recursos que son asignados a una línea han de tener la demanda de producto repartida convenientemente en base a su capacidad y disponibilidad.

Por último se llega al enfoque operativo, el cual debe lidiar con las decisiones in situ, de rápida reacción. En este grupo de decisiones se incluye la entrada de piezas, que la constan la programación de tareas y su control posterior y la selección de rutas que han de tomar los diferentes flujos productivos a la hora de ser procesados.

Tras la consecución de toda esta cadena de decisiones y el procesado se podrán obtener los resultados operativos, los cuales han de servir de nutriente para los siguientes ciclos de decisión a los tres niveles y asegurar la mejora continua del sistema.

De cara a poder situar el Trabajo de Fin de Máster del que se va a partir, las funciones que le atañan han sido la selección de ítems, la carga de máquinas y la selección de rutas. Más en concreto ha dado respuesta a cuáles de los pedidos en cola serán procesados en el horizonte semanal de estudio, la distribución de las herramientas que

necesitan las máquinas y el reparto de la demanda entre sus rutas disponibles.

#### **4.2.1 DATOS Y RESULTADOS DE LA CARGA DE MÁQUINAS.**

En este sub-apartado se va a resumir los datos y resultados del TFM desarrollado por [Romo de Vivar, 2015] y que resolvió la carga de máquinas semanal en la misma empresa objeto de estudio. Como ya se ha comentado, los resultados de dicho TFM son los datos de partida de este TFG.

El problema comparte gran parte del enunciado con el ya descrito para la secuenciación, aun así se debe de introducir otros que no atañan al de este trabajo:

- Cada operación en una máquina presente en la línea necesita de un tipo de herramienta para poder procesar las piezas que pasen por ella, de tal manera que cada tipo de herramienta tiene un tiempo de vida útil el cual varía en función del tamaño y material de cada una. Se conoce la cantidad de copias disponibles en almacén y el espacio que ocupa cada una de ellas en el almacén de herramientas, la medida de dimensión será el número de espacios que ocupa en la recámara de cada máquina.
- El modelo debe considerar almacenes finitos para cada máquina y por ello se debe decidir el reparto de piezas entre máquinas considerando la asignación duplicada de herramientas.
- El equilibrado de tiempos o cargas de cada estación se modela a través de un porcentaje máximo de desviación respecto a la carga media entre todas las estaciones.
- Cada pedido tiene asignada una prioridad de procesado de cara a la selección de ítems, la cual está determinada en función de la cantidad de piezas que contenga el pedido. Se tienen disponibles 18 pedidos, los cuales se ha de decidir cuales estarán en el horizonte semanal.

Todos los datos que se recogen aquí tienen una tabla de datos consigo, las cuales en cuestión de tiempos y set-ups han sido utilizadas en este trabajo.

Toda esta información recogida es introducida en un modelo único que persigue aportar solución a la asignación de las herramientas y la decisión de que pedidos escoger. Su función objetivo es maximizar la suma de pedidos ponderados por su prioridad que se pueden fabricar dentro de una semana. Las variables de decisión que utiliza el mismo son:

- Una variable binaria que decida si un pedido ha sido seleccionado para fabricarse en el horizonte temporal.
- Una variable que recoja el número de copias de una herramienta que ha sido asignado a cada máquina.
- Una variable que tome valores continuos de 0 a 1 que recoja la fracción de un pedido que ha sido realizada en cada una de sus rutas disponibles (cuando el problema sea multiruta).
- Una variable que recoja la carga de trabajo total que tiene cada máquina.

- Y una variable binaria que determine si una ruta ha sido utilizada o no.

Los datos que necesita el modelo para poder ser resuelto son:

- En relación a las herramientas, número máximo de copias por máquina, número de posiciones que ocupa cada herramienta en los almacenes de máquina y la vida útil de la herramienta.
- En relación a los pedidos, la prioridad de cada uno, el número de piezas que tiene cada uno, tiempos de operación de cada pieza en cada máquina, tiempo disponible de operación en cada máquina y el tiempo de set-up de cada pedido en cada máquina por la que pasa.

La resolución se separó en dos principales escenarios, el multiruta y el monoruta, que se presentan a modo de resumen en esta tabla explicativa:

| Estaciones |            | 1       | 2       | 3    | 4       | 5       | 6       | 7      | 8       | 9       |
|------------|------------|---------|---------|------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Monoruta   | Carga      | 2192    | 2241,6  | 2260 | 2143    | 2194    | 2194    | 2177   | 1880    | 1479,5  |
|            | Diferencia | 8,0     | 48,4    | 30,0 | 57,0    | 6,0     | 6,0     | 23,0   | 20,0    | 105,5   |
| Multiruta  | Carga      | 1935,92 | 1946,71 | 1603 | 1800,64 | 1498,79 | 1946,71 | 1775,4 | 1498,79 | 1498,79 |
|            | Diferencia | 264,08  | 343,29  | 687  | 399,36  | 701,21  | 253,29  | 424,6  | 381,21  | 86,21   |

*Tabla 4-1 Resultado de equilibrado de cargas: Limite de cargas.*

En la fila **carga** se detallan los resultados de ambos modelos en cuestión de minutos totales de uso, y en la fila **diferencia** resulta de restar la carga máxima que se aporta como dato a la cada una de las cargas resultantes.

Se puede apreciar la reducción notoria de las cargas en las máquinas tras la aplicación de la doble ruta por pedido.

Los resultados indicaron para ambos casos que todos los pedidos que se encontraban pendientes, los 18 podían ser introducidos en la frontera temporal semanal, por lo que se hicieron otras pruebas con un mayor número de pedidos que no serán utilizados en este trabajo.

Por otro lado también se tienen los resultados de la asignación de herramientas y su porcentaje de uso respecto al total disponible, cuyos resultados son válidos, lo que quiere decir que no hubo que utilizar más herramientas de las que estaban adquiridas en ninguno de los casos (multiruta y monoruta).

Además, y como se introducirá en la sección posterior de modelado se tienen los datos de porcentaje de lote producido en cada ruta como salida del modelo multiruta.

Este modelo a pesar de dar una solución de carga que representa el tiempo de finalización de todos los pedidos que pasan por cada una de las máquinas, no aporta datos relacionados con la secuenciación. Uno de los objetivos de este trabajo consistirá en comprobar si la secuenciación de pedidos (a nivel operativo) valida la carga de máquinas (a nivel táctico). En general, la carga no considera las restricciones de precedencias entre operaciones para un pedido, ni la transferencia entre máquinas. Este tipo de consideraciones son las que llevan a tener que hacer un modelo orientado a la secuenciación que se nutra de parte de los datos que salen del equilibrado de carga, y se deba plantear la nueva función objetivo que se ha comentado anteriormente.

# 5 MODELADO DEL PROBLEMA

---

En esta sección se propondrán diversos modelos que secuenciarán un conjunto de pedidos en un horizonte semanal propuesto. Para ello y para validar la posibilidad de viabilidad de cada modelo, el mismo no podrá sobrepasar el número total de minutos que puede disponer cada recurso en un horizonte semanal. La distribución en taller es de tipo Job-shop, lo que significa que cada trabajo tendrá una secuencia diferente de máquinas para convertirse en un producto listo para su entrega al cliente y nuestra solución a valorar será cada una de las secuencias de procesamiento de cada máquina. El autor [Romo de Vivar, 2015] prueba con dos posibilidades de procesamiento de cada tipo de electrodo, un primer escenario donde cada producto solo tendrá una ruta posible para su procesamiento y otro escenario donde todos de los trabajos tienen disponible una segunda ruta alternativa. Para el caso multiruta la proporción de demanda que usa cada ruta es solución del modelo propuesto por el autor, por lo que el problema al que se da solución en este trabajo no será un Job-shop flexible. Para ello partiremos con un modelo generalizado donde lo único que cambiará será su input de datos.

A modo de introducción, los modelos que van a ser mostrados en esta sección por orden de aparición son:

- **Modelos de lote completo**, los cuales todas las piezas a procesar en cada pedido se transferirán como un lote compacto.
  - **Monoruta**, solo se considera una única secuencia de máquinas de procesamiento para cada pedido.
  - **Multiruta**, considerará un máximo de dos rutas por la que circula parte de cada pedido.
- **Modelos con lote de transferencia unitario**, los cuales consideran que un lote es transferible pieza a pieza a otras máquinas.
  - **Monoruta**, de igual manera solo habrá una ruta por pedido.
  - **Multiruta**, habrá dos rutas como máximo por pedido.

## 5.1 DESCRIPCIÓN

En esta sección los trabajos estarán dimensionados por lotes, donde cada lote tendrá todas las piezas del mismo pedido. Debido a la necesidad de realizar un set-up entre piezas diferentes, los lotes no se interrumpen una vez que han sido iniciados en una máquina. Cada lote tendrá una secuencia de máquinas por la que tendrá que pasar y su tiempo de procesamiento será igual a la suma de los tiempos individuales de cada una de las piezas que lo incluyan más su tiempo de set-up, el cual aunque sea el primer lote ejecutado en una máquina al comienzo del horizonte deberá ser realizado.

La preparación de la máquina a un lote específico, el set-up, al ser manual no podrá hacerse hasta que la máquina

termine su lote anterior. Por otro lado las distancias por el transporte de lote se consideran despreciables y los buffers de espera de las máquinas son ilimitados.

Como el horizonte de las máquinas es semanal, los trabajos que se liberen al comienzo del horizonte serán los únicos que se introduzcan en él. No se considerarán restricciones de fechas de entrega, ya que con respetar la carga máxima semanal todos los pedidos llegarían a tiempo.

Todos los datos de demanda fueron sacados de los datos históricos de los años 2013 y 2014 y comparados contra los datos de Abril y Mayo de 2015, de manera que pudiera determinarse un volumen de producción semanal, el cual servirá como horizonte de planificación.

## 5.2 DATOS DEL PROBLEMA

- Se cuenta con las 9 máquinas, comentadas en la sección anterior, denotadas por  $M_j (j = 1 \dots 9)$ .

- En la frontera temporal que se va a trabajar en el modelo se disponen de 18 pedidos a procesar denotados por  $J_i (i = 1 \dots 18)$

### 5.2.1 ESCENARIO MONORUTA

| Demanda | Pieza | Nº Oper | Máquina | r  | T. Proceso | Dem x T.P | T. Set-up | T.Pr. Total |
|---------|-------|---------|---------|----|------------|-----------|-----------|-------------|
| 31      | 1     | 1       | 9       | 1  | 47,5       | 1472,5    | 7,0       | 1479,5      |
|         |       | 2       | 6       | 2  | 31,0       | 961,0     | 6,0       | 967,0       |
| 35      | 2     | 1       | 3       | 3  | 12,0       | 420,0     | 6,0       | 426,0       |
| 50      | 3     | 1       | 7       | 4  | 20,0       | 1000,0    | 6,0       | 1006,0      |
| 10      | 4     | 1       | 3       | 5  | 40,0       | 400,0     | 5,0       | 405,0       |
| 10      | 5     | 1       | 3       | 6  | 42,0       | 420,0     | 12,0      | 432,0       |
|         |       | 2       | 2       | 7  | 25,0       | 250,0     | 4,0       | 254,0       |
| 50      | 6     | 1       | 8       | 8  | 37,5       | 1875,0    | 5,0       | 1880,0      |
|         |       | 2       | 5       | 9  | 17,0       | 850,0     | 3,0       | 853,0       |
| 10      | 7     | 1       | 2       | 10 | 50,0       | 500,0     | 11,0      | 511,0       |
| 36      | 8     | 1       | 7       | 11 | 20,0       | 720,0     | 5,0       | 725,0       |
|         |       | 2       | 5       | 12 | 29,0       | 1044,0    | 3,0       | 1047,0      |
| 56      | 9     | 1       | 1       | 13 | 39,0       | 2184,0    | 8,0       | 2192,0      |
| 30      | 10    | 1       | 7       | 14 | 14,7       | 441,0     | 5,0       | 446,0       |
|         |       | 2       | 2       | 15 | 12,0       | 360,0     | 5,0       | 365,0       |
| 28      | 11    | 1       | 3       | 16 | 23,0       | 644,0     | 9,0       | 653,0       |

|    |    |   |   |    |      |        |      |        |
|----|----|---|---|----|------|--------|------|--------|
|    |    | 2 | 6 | 17 | 30,0 | 840,0  | 5,0  | 845,0  |
| 14 | 12 | 1 | 6 | 18 | 13,0 | 182,0  | 11,0 | 193,0  |
|    |    | 2 | 2 | 19 | 27,0 | 378,0  | 5,0  | 383,0  |
| 7  | 13 | 1 | 3 | 20 | 47,0 | 329,0  | 15,0 | 344,0  |
|    |    | 2 | 6 | 21 | 27,0 | 189,0  | 0,0  | 189,0  |
| 36 | 14 | 1 | 4 | 22 | 59,0 | 2124,0 | 19,0 | 2143,0 |
| 8  | 15 | 1 | 2 | 23 | 15,6 | 124,8  | 10,0 | 134,8  |
| 12 | 16 | 1 | 2 | 24 | 38,3 | 459,6  | 5,0  | 464,6  |
| 5  | 17 | 1 | 5 | 25 | 55,0 | 275,0  | 19,0 | 294,0  |
| 10 | 18 | 1 | 2 | 26 | 12,6 | 126,0  | 4,0  | 130,0  |

Tabla 5-1 Marco de datos de entrada del escenario monoruta

La tabla anterior incluye toda la información que los modelos de secuenciación monoruta usarán para resolver el problema, todos los datos temporales están en minutos:

- **Demanda** contiene el número de piezas por lote a producir.
- **Pieza** sugiere el número de lote que tiene esa demanda.
- **Nº Oper** tendrá solo una fila de valor 1 si ese lote tiene solo una máquina en su ruta de procesado y 1 y 2 si tiene dos máquinas en su ruta.
- **Máquina** contiene la máquina en la que ha de ser procesada esa operación.
- **r (código de operación)** que será clave para la identificación de operaciones en los modelos, enumera comenzando por el primer lote todas las operaciones que existen entre los 18 lotes
- **T.Proceso** es el tiempo de proceso estimado de cada operación individual dentro de un lote.
- **Dem x T.P** resulta del producto de la demanda y los tiempos de proceso individuales, resultando el tiempo de proceso de un lote sin tiempos de set-up.
- **T. Set-up** tiempo de set-up del lote en la máquina que se está procesando la operación
- **T. Pr. Total** resulta de la suma de Dem x T.P y T. Set-up y nos da el tiempo total que necesitará un lote para ser procesado en una máquina incluyendo tiempos de set-up.

Desde una perspectiva máquina-operación se presenta también la siguiente tabla para ver la distribución de las diferentes operaciones en las máquinas.

|           |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>M1</b> | 13 (9)  |         |         |         |         |         |         |
| <b>M2</b> | 7 (5)   | 10 (7)  | 15 (10) | 19 (12) | 23 (15) | 24 (16) | 26 (18) |
| <b>M3</b> | 3 (2)   | 5 (4)   | 6 (5)   | 16 (11) | 20 (13) |         |         |
| <b>M4</b> | 22 (14) |         |         |         |         |         |         |
| <b>M5</b> | 9 (6)   | 12 (8)  | 25 (17) |         |         |         |         |
| <b>M6</b> | 2 (1)   | 17 (11) | 18 (12) | 21 (13) |         |         |         |
| <b>M7</b> | 4 (3)   | 11 (8)  | 14 (10) |         |         |         |         |

|           |       |  |  |  |  |  |  |
|-----------|-------|--|--|--|--|--|--|
| <b>M8</b> | 8 (6) |  |  |  |  |  |  |
| <b>M9</b> | 1 (1) |  |  |  |  |  |  |

Tabla 5-2 Distribución de operaciones en máquinas en el entorno monoruta

Se trata de una tabla de un eje, una fila por máquina y dentro de cada fila se sigue una estructura de  $r(i)$ , operación perteneciente a un producto. Han sido ordenadas por orden de menor a mayor ya que será como el modelo las verá. Se puede apreciar que las máquinas 2 y 3 son las más cargadas de operaciones, pudiendo ser previsiblemente determinantes en la secuenciación.

Se puede observar que si se suman los tiempos de procesados totales para cada máquina se obtiene la carga total obtenida como resultado del TFM de [Romo de Vivar, 2015] y dada en la Tabla 4-1.

## 5.2.2 ESCENARIO MULTIRUTA

Este escenario necesita de un mayor análisis de los datos, como ya se ha nombrado antes, este modelo no elegirá la carga de una operación entre sus rutas disponibles como tendría que hacer un modelo de Job-shop flexible. En este caso el modelo va a comportarse igual que el escenario monoruta solo que ahora cada producto tiene dos líneas que actúan individualmente, lo que se traducirá en un mayor número de operaciones y por ello un aumento de su complejidad.

Lo primero es analizar uno de los outputs que proporciona el modelo de equilibrado de carga, la proporción de ruta. La proporción de ruta es un porcentaje sobre cien que repartirá las demandas que se tenían por cada producto en el escenario monoruta en las dos nuevas rutas. Para ello es necesario redondear con cero decimales los resultados de proporción ya que son datos de carácter entero.

| Mezcla    | R1    | R2    | Dem total | D.Real R1 | D.Real R2 |
|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1</b>  | 0,98  | 0,02  | 31        | 30        | 1         |
| <b>2</b>  | 1     | 0     | 35        | 35        | 0         |
| <b>3</b>  | 0,875 | 0,125 | 50        | 44        | 6         |
| <b>4</b>  | 1     | 0     | 10        | 10        | 0         |
| <b>5</b>  | 0     | 1     | 10        | 0         | 10        |
| <b>6</b>  | 0,78  | 0,22  | 50        | 39        | 11        |
| <b>7</b>  | 0     | 1     | 10        | 0         | 10        |
| <b>8</b>  | 0,42  | 0,58  | 36        | 15        | 21        |
| <b>9</b>  | 0,82  | 0,18  | 56        | 46        | 10        |
| <b>10</b> | 0     | 1     | 30        | 0         | 30        |
| <b>11</b> | 0,09  | 0,91  | 28        | 3         | 25        |
| <b>12</b> | 1     | 0     | 14        | 14        | 0         |
| <b>13</b> | 0,02  | 0,98  | 7         | 0 (*)     | 7         |

|    |      |      |    |    |       |
|----|------|------|----|----|-------|
| 14 | 0,65 | 0,35 | 36 | 23 | 13    |
| 15 | 0    | 1    | 8  | 0  | 8     |
| 16 | 0,97 | 0,03 | 12 | 12 | 0 (*) |
| 17 | 0,45 | 0,55 | 5  | 2  | 3     |
| 18 | 0    | 1    | 10 | 0  | 10    |

Tabla 5-3 Análisis de proporción real de piezas en rutas

- En primer lugar **R1** y **R2** representan esos resultados del modelo de equilibrado que se había mencionado. Las casillas marcadas sin asterisco son aquellas que el propio modelo de equilibrado de carga ha dado por nulas y por tanto de primera mano quedan cerradas para esta frontera temporal.
- **Dem. Total** corresponde a las demandas totales que tiene cada producto.
- Por último **D.Real R1** y **D.Real R2** corresponde a las demandas ya repartidas y redondeadas con cero decimales tenemos dos casillas marcadas con un asterisco, las cuales son rutas que no van a ser utilizadas a pesar de tener parte del porcentaje del producto. El tamaño del lote del propio producto es tan pequeño que no llega a ni a un lote de una pieza.

Tras tener las demandas de las rutas de los productos se tienen todos los datos para presentar el marco de datos para el escenario multiruta; todos los valores temporales están en minutos:

| Pieza | Ruta | Demanda | Nº Oper. | Máquina | r  | T. Proceso | Dem. x T.P | T. Set-up | T. Pr. Total |
|-------|------|---------|----------|---------|----|------------|------------|-----------|--------------|
| 1     | 1    | 30      | 1        | 9       | 1  | 47,5       | 1425,0     | 7,0       | 1432,0       |
|       |      |         | 2        | 6       | 2  | 31,0       | 930,0      | 6,0       | 936,0        |
|       | 2    | 1       | 1        | 1       | 3  | 30,0       | 30,0       | 10,0      | 40,0         |
| 2     | 1    | 35      | 1        | 3       | 4  | 12,0       | 420,0      | 6,0       | 426,0        |
|       | 2    | 0       | 1        | 7       | 5  | 16,0       | 0,0        | 1,0       | 1,0          |
| 3     | 1    | 44      | 1        | 7       | 6  | 20,0       | 880,0      | 6,0       | 886,0        |
|       | 2    | 6       | 1        | 2       | 7  | 11,0       | 66,0       | 5,0       | 71,0         |
| 4     | 1    | 10      | 1        | 3       | 8  | 40,0       | 400,0      | 5,0       | 405,0        |
|       | 2    | 0       | 1        | 7       | 9  | 26,0       | 0,0        | 3,0       | 3,0          |
| 5     | 1    | 0       | 1        | 3       | 10 | 42,0       | 0,0        | 12,0      | 12,0         |
|       |      |         | 2        | 2       | 11 | 25,0       | 0,0        | 4,0       | 4,0          |
|       | 2    | 10      | 1        | 4       | 12 | 10,0       | 100,0      | 7,0       | 107,0        |
| 6     | 1    | 39      | 1        | 8       | 13 | 37,5       | 1462,5     | 5,0       | 1467,5       |
|       |      |         | 2        | 5       | 14 | 17,0       | 663,0      | 3,0       | 666,0        |
|       | 2    | 11      | 1        | 4       | 15 | 20,0       | 220,0      | 7,0       | 227,0        |
| 7     | 1    | 0       | 1        | 2       | 16 | 50,0       | 0,0        | 11,0      | 11,0         |
|       | 2    | 10      | 1        | 6       | 17 | 13,0       | 130,0      | 0,0       | 130,0        |
| 8     | 1    | 15      | 1        | 7       | 18 | 20,0       | 300,0      | 5,0       | 305,0        |

|    |   |    |   |   |    |      |        |      |        |
|----|---|----|---|---|----|------|--------|------|--------|
|    |   |    | 2 | 5 | 19 | 29,0 | 435,0  | 3,0  | 438,0  |
|    | 2 | 21 | 1 | 3 | 20 | 3,5  | 73,5   | 3,5  | 77,0   |
|    |   |    | 2 | 2 | 21 | 6,0  | 126,0  | 4,0  | 130,0  |
| 9  | 1 | 46 | 1 | 1 | 22 | 39,0 | 1794,0 | 8,0  | 1802,0 |
|    | 2 | 10 | 1 | 2 | 23 | 17,0 | 170,0  | 4,0  | 174,0  |
| 10 | 1 | 0  | 1 | 7 | 24 | 14,7 | 0,0    | 5,0  | 5,0    |
|    |   |    | 2 | 2 | 25 | 12,0 | 0,0    | 5,0  | 5,0    |
|    | 2 | 30 | 1 | 3 | 26 | 12,5 | 375,0  | 6,0  | 381,0  |
|    |   |    | 2 | 6 | 27 | 6,0  | 180,0  | 0,0  | 180,0  |
| 11 | 1 | 3  | 1 | 3 | 28 | 23,0 | 69,0   | 9,0  | 78,0   |
|    |   |    | 2 | 6 | 29 | 30,0 | 90,0   | 5,0  | 95,0   |
|    | 2 | 25 | 1 | 7 | 30 | 17,0 | 425,0  | 0,0  | 425,0  |
|    |   |    | 2 | 2 | 31 | 7,0  | 175,0  | 5,0  | 180,0  |
| 12 | 1 | 14 | 1 | 6 | 32 | 13,0 | 182,0  | 11,0 | 193,0  |
|    |   |    | 2 | 2 | 33 | 27,0 | 378,0  | 5,0  | 383,0  |
|    | 2 | 0  | 1 | 2 | 34 | 11,0 | 0,0    | 4,0  | 4,0    |
|    |   |    | 2 | 6 | 35 | 27,0 | 0,0    | 0,0  | 0,0    |
| 13 | 1 | 0  | 1 | 3 | 36 | 47,0 | 0,0    | 15,0 | 15,0   |
|    |   |    | 2 | 6 | 37 | 27,0 | 0,0    | 0,0  | 0,0    |
|    | 2 | 7  | 1 | 7 | 38 | 10,0 | 70,0   | 5,0  | 75,0   |
|    |   |    | 2 | 2 | 39 | 17,0 | 119,0  | 5,0  | 124,0  |
| 14 | 1 | 23 | 1 | 4 | 40 | 59,0 | 1357,0 | 19,0 | 1376,0 |
|    | 2 | 13 | 1 | 2 | 41 | 20,0 | 260,0  | 4,0  | 264,0  |
| 15 | 1 | 0  | 1 | 2 | 42 | 15,6 | 0,0    | 10,0 | 10,0   |
|    | 2 | 8  | 1 | 6 | 43 | 16,4 | 131,2  | 0,0  | 131,2  |
| 16 | 1 | 12 | 1 | 2 | 44 | 38,3 | 459,0  | 5,0  | 464,0  |
|    | 2 | 0  | 1 | 6 | 45 | 40,0 | 0,0    | 0,0  | 0,0    |
| 17 | 1 | 2  | 1 | 5 | 46 | 55,0 | 110,0  | 19,0 | 129,0  |
|    | 2 | 3  | 1 | 6 | 47 | 11,5 | 34,5   | 0,0  | 34,5   |
| 18 | 1 | 0  | 1 | 2 | 48 | 12,6 | 0,0    | 4,0  | 4,0    |
|    | 2 | 10 | 1 | 6 | 49 | 15,9 | 159,0  | 0,0  | 159,0  |

Tabla 5-4 Marco de datos de entrada del escenario multiruta

- **Pieza** número de pedido.
- **Ruta** número de ruta alternativa para cada pedido.
- **Demanda** contiene el número de piezas a producir por pieza y ruta de pedido.

- **Nº Oper** tendrá solo una fila de valor 1 si ese lote tiene solo una máquina en su ruta de procesado y 1 y 2 si tiene dos máquinas en su ruta.
- **Máquina** contiene la máquina en la que ha de ser procesada esa operación.
- **r** número de operación donde la primera es la primera operación del pedido 1 ruta 1. Útil para la realización de los modelos matemáticos.
- **T.Proceso** es el tiempo de proceso estimado de cada operación individual en una máquina.
- **Dem x T.P** producto de la demanda y los tiempos de proceso individuales, resultando el tiempo de proceso de un lote sin tiempos de set-up.
- **T. Set-up** tiempo de set-up del lote en la máquina que se está procesando la operación, aunque la ruta no sea usada, seguirán teniendo el valor de su tiempo de set-up.
- **T. Pr. Total** resulta de la suma de  $Dem \times T.P$  y  $T. Set-up$  y da el tiempo total que necesitará un lote para ser procesado en una máquina incluyendo tiempos de set-up, las rutas no usadas tendrán un valor temporal que no es más que su tiempo de set-up.

Las filas parciales marcadas representan las rutas no usadas tras el análisis de carga.

De igual manera se dispone de una tabla de distribución de operaciones entre las máquinas para su mejor visualización.

|    |             |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| M1 | 3<br>(1.2)  | 22<br>(9.1) |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| M2 | 7<br>(3.2)  | 11<br>(5.1) | 16<br>(7.1)  | 21<br>(8.2)  | 23<br>(9.2)  | 25<br>(10.1) | 31<br>(11.2) | 33<br>(12.1) | 34<br>(12.2) | 39<br>(13.2) | 41<br>(14.2) | 42<br>(15.1) | 44<br>(16.1) | 48<br>(18.1) |
| M3 | 4<br>(2.1)  | 8<br>(4.1)  | 10<br>(5.1)  | 20<br>(8.2)  | 26<br>(10.2) | 28<br>(11.1) | 36<br>(13.1) |              |              |              |              |              |              |              |
| M4 | 12<br>(5.2) | 15<br>(6.2) | 40<br>(14.1) |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| M5 | 14<br>(6.1) | 19<br>(8.1) | 46<br>(17.1) |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| M6 | 2<br>(1.1)  | 17<br>(7.2) | 27<br>(10.2) | 29<br>(11.1) | 32<br>(12.1) | 35<br>(12.2) | 37<br>(13.1) | 43<br>(15.2) | 45<br>(16.2) | 47<br>(17.2) | 49<br>(18.2) |              |              |              |
| M7 | 5<br>(2.2)  | 6<br>(3.1)  | 9<br>(4.2)   | 18<br>(8.1)  | 24<br>(10.1) | 30<br>(11.2) | 38<br>(13.2) |              |              |              |              |              |              |              |
| M8 | 13<br>(6.1) |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| M9 | 1<br>(1.1)  |             |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |

Tabla 5-5 Distribución de operaciones en máquinas en el entorno multiruta.

Se presenta una tabla donde los trabajos están distribuidos por máquinas y cada trabajo tiene una notación de

o(i.ruta), *operación* perteneciente a un producto *i* en su ruta *ruta*. También se han marcado aquellas operaciones que no van a ser realizadas ya que su ruta no se usa.

Respecto al ya comentado límite de tiempos disponibles para cada máquina dentro de la frontera temporal semanal y sobre las que la secuenciación ha de ceñirse, se presenta la siguiente tabla:

| Estación    | Límite de carga |
|-------------|-----------------|
| 1           | 2200,00         |
| 2           | 2290,00         |
| 3           | 2290,00         |
| 4           | 2200,00         |
| 5           | 2200,00         |
| 6           | 2200,00         |
| 7           | 2200,00         |
| 8           | 1880,00         |
| 9           | 1585,00         |
| Carga media | 2103,22         |
| Carga total | 19045,00        |

Tabla 5-6 Límites de tiempo en máquinas para caso monoruta y multiruta.

### 5.3 MODELADO DEL PROBLEMA

A continuación se describen los modelos que formarán el marco de resolución del problema planteado, en los cuales variando los inputs se originarán ambos escenarios antes descritos.

Como se ha comentado anteriormente, el problema del Job-shop es NP-Hard. Incluso los modelos más sencillos necesitan largos tiempos de procesado y es por ello que la principal premisa de los modelos aquí presentados es la reducción drástica de la complejidad para que el software de optimización le lleve el menor tiempo resolver los modelos.

La primera medida eficaz para reducir la complejidad es reducir las dimensiones de las variables de decisión y de los datos. Lo que significa que una variable solo dependa de uno o dos parámetros al igual que los datos, muy a diferencia de lo que se puede ver en la literatura de Job-shop, modelos como el de [Manne, 1960], el cual ha servido como punto de partida para realizar los propuestos, que se ven variables de decisión de hasta 4 dimensiones. La simplificación del modelo se basa en cómo se ha podido ver, la enumeración de las operaciones y aumentar el uso de conjuntos.

También ayuda el bajo nivel de abstracción que tiene el modelo, no se consideran restricciones ( $\beta$ ) que requieran añadir restricciones al modelo que necesiten procesado extra, se necesita averiguar la secuenciación óptima para

poder servir de guía en la toma de decisiones.

### 5.3.1 MODELO DE LOTES COMPLETO

#### 5.3.1.1 Modelo MILP para monoruta.

- *Indices*
  - Número de productos  $i = (1..18)$
  - Número de máquinas  $k = (1..9)$
  - Número de operación  $r, r' = (1..26)$
- *Conjuntos*
  - Conjunto de trabajos que pertenecen a la pieza  $i$ ;  $P_i$
  - Conjunto de operaciones que son procesadas en la máquina  $k$ ;  $M_k$
- *Datos del problema*
  - $t_r$  tiempo de procesado de la operación  $r$ .
  - $S_r$  tiempo de set-up de la operación  $r$ .
  - $M$  número muy alto.
  - $E$  número muy pequeño.
- *Variables de decisión*
  - $s_r$  tiempo de inicio de la operación  $r$ .
  - $s'_r$  tiempo de inicio del tiempo de set-up de la operación  $r$ .
  - $c_r$  tiempo de terminación de la operación  $r$ .
  - $C_{max}$  máximo tiempo de finalización de todas las operaciones.
  - $Y_{rr'}$  Variable binaria que será 1 si la operación  $r$  va antes (no tiene porqué preceder) que la operación  $r'$  y 0 si no.

$$\text{Min } C_{max} + E * \sum_{r=1}^{26} c_r$$

*s.a*

$$s'_r = s_r + S_r \quad \forall r$$

[1]

$$c_r = s'_r + t_r \quad \forall r$$

[2]

$$s_r \geq c_{r'} \quad \forall r > r': (r, r') \in P_i$$

[3]

$$s_r \geq c_{r'} - M * Y_{rr'} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[4]

$$s_{r'} \geq c_r - M * (1 - Y_{rr'}) \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[5]

$$C_{max} \geq c_r \quad \forall r$$

[6]

*Cuyas variables:*

$$s'_r \geq 0 \quad \forall r$$

$$s_r \geq 0 \quad \forall (r, r')$$

$$c_r \geq 0 \quad \forall (r, r')$$

$$C_{max} \geq 0$$

$$Y_{rr'} \in \{0,1\} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

Se puede apreciar que el modelo resultante es simple, los outputs son vectores de 26 elementos donde estará toda la información excepto la variable binaria que no nos aporta como output, simplemente es útil para resolver el modelo.

*Descripción de restricciones y función objetivo.*

La función objetivo busca primordialmente reducir el máximo tiempo de finalización que es seleccionado por una de las restricciones y el segundo sumando busca reducir lo máximo cada uno de los tiempos de finalización de cada operación. Con  $E = 0,00001$  veces este objetivo es suficiente para que reduzca todos los  $c_r$  del modelo. Sin este añadido el modelo nos daría el mismo máximo tiempo de finalización pero el resto de  $c_r$  estarían dispuestos aleatoriamente (respetando las restricciones), dejando tiempos muertos. Es por ello que en cierta medida es un problema biobjetivo donde se ha usado el método de la suma ponderada pero estos objetivos no son contrapuestos, séase que la mejora de uno no afecta negativamente al otro por lo general, aunque puede haber excepciones donde una reducción del  $C_{max}$  pueda originar un empeoramiento de la suma total de tiempos de finalización.

La restricción [1] podría haber sido omitida del modelo en nuestra búsqueda de un modelo compacto ya que se podría haber añadido al tiempo de procesado  $t_r$  el valor del tiempo de set-up, pero para un mejor análisis del resultado se ha dispuesto. En caso de necesitar rebajar el tiempo de procesado será una de las medidas que se tomen. La restricción se encarga de diferenciar los dos tipos de *starts* que tiene cada trabajo por un lado esta  $s_r$  que es el inicio del trabajo y  $s'_r$  que será el inicio tras la preparación de la máquina.

En la restricción [2] se busca sacar el tiempo de finalización  $c_r$  para cada una de las operaciones, para ello a partir del comienzo de la operación tras el set-up  $s'_r$  se le añade el tiempo de procesado.

La restricción [3] busca limitar la secuencia de operaciones ordenadas que ha de tener un producto para ser terminado,  $\pi_i$ . Para ello de manera ascendente irá sometiendo una operación a su operación siguiente de manera que como mínimo (puede haber tiempo de espera) su instante de inicio sea el mismo que el de finalización de su operación anterior. Para ello necesita dos subíndices  $r$  para poder hacer la comparación operación-operación prima.

La restricción [4] busca en cambio limitar la secuencia de operaciones ordenadas que ha de tener una máquina entre todas sus operaciones que necesitan de la misma. Para ello y con ayuda de la restricción [5] fija relaciones entre dos operaciones candidatas a ser colocadas en la secuencia  $\pi_k$  en una posición determinada. Una operación  $r$  si precede a una operación  $r'$  la variable  $Y_{rr'}$  se activará (valor igual a 1) y con ello un número muy grande restará al tiempo de finalización de  $r'$  lo que hará que no le aporte ninguna limitación a  $r$ . Al haberse activado esa binaria de precedencia en la restricción [5] pasará lo contrario, ahora es  $r$  la que limita a  $r'$  de manera que no podrá comenzar a no ser que termine el mismo (como mínimo). Como se describió en la sección de datos del problema, la variable  $Y_{rr'}$  define precedencia para todo el horizonte temporal, no solo la inmediatamente antes de la operación marcada, por lo que si una operación es última en la secuencia el resto de operaciones que van antes estarán limitando a la misma.

La restricción [6] busca darle el máximo valor a  $C_{max}$  de todos los tiempos de finalización.

Por último se han definido la naturaleza de las variables de decisión,  $Y_{rr'}$  la única que tiene carácter no continuo (y es por ello que es un modelo de programación lineal mixto entera), el resto son continuas por el mero hecho de representar a instantes temporales.

### 5.3.1.2 Modelo MILP para multiruta.

Este modelo ha sido definido para el caso monoruta en el que solo había 26 operaciones a realizar. Para el caso del modelo multiruta existen un total de 49 operaciones a realizar de las cuales 14 no se realizan ya que sus rutas no tienen demanda asignada, sin embargo se mantienen en el modelo para hacerlo lo más generalizado posible ya que en otros horizontes temporales diferentes al que se está estudiando pueden estar activadas esas rutas. Mientras que en la matriz de tiempos esas operaciones tengan tiempos nulos no afectarán a la solución ya que comenzarán, acabarán y darán paso a la siguiente operación en el mismo instante temporal.

La estructura del modelo matemático permanecería intacta para el caso multiruta exceptuando ciertos valores que atañan al número de operaciones que se tienen. Lo que realmente varía son los inputs que se introducirán para su resolución.

Primeramente debemos cambiar el índice operación:

- Número de productos  $i = (1..18)$
- Número de máquinas  $k = (1..9)$
- Número de operación  $r, r' = (1..49)$

Y consecuentemente el modelo sufre variaciones:

$$\text{Min } C_{max} + E * \sum_{r=1}^{49} C_r$$

s.a

$$s_r' = s_r + S_r \quad \forall r$$

[1]

$$c_r = s_r' + t_r \quad \forall r$$

[2]

$$s_r \geq c_{r'} \quad \forall r > r': (r, r') \in P_i$$

[3]

$$s_r \geq c_{r'} - M * Y_{rr'} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[4]

$$s_r' \geq c_r - M * (1 - Y_{rr'}) \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[5]

$$C_{max} \geq c_r \quad \forall r$$

[6]

Cuyas variables:

$$s_r' \geq 0 \quad \forall r$$

$$s_r \geq 0 \quad \forall (r, r')$$

$$c_r \geq 0 \quad \forall (r, r')$$

$$C_{max} \geq 0$$

$$Y_{rr'} \in \{0,1\} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

Como se puede observar el único cambio sufrido atañe al sumatorio de la función objetivo.

Como se dispuso anteriormente, gracias a la distribución de las máquinas del taller las cuales están todas bastante juntas y los tiempos de transporte son tan pequeños que pueden ser despreciables se plantea una alternativa de secuenciación. Esa alternativa es el lote de transferencia, el cual permitirá aumentar el flujo productivo en las máquinas y con ello una reducción drástica de los tiempos de finalización.

### 5.3.2 MODELO DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO

El lote de transferencia busca permitir a un lote flexibilidad de no tener porqué terminar completamente de ser procesado en una máquina para pasar a la siguiente de tal manera que cuando ciertas piezas del mismo se terminen en una máquina podrán ser transportadas hacia otras máquinas como ya se comentó en secciones anteriores. Muchos son los parámetros que pueden definir un lote de transferencia, pero para este caso de estudio se definirán de la siguiente manera:

- La transferencia de lote podrá hacerse de manera unitaria, de manera que en cuanto una pieza de un lote sea completada en una máquina podrá ser transferida a la siguiente. Es un caso muy ideal

donde los tiempos de transporte unitario serían bastante altos pero resulta útil como primer contacto.

- La transferencia de lote no podrá ser pausada, lo que quiere decir que una vez que se comiencen a transferir piezas de un tipo hacia una máquina, esa máquina no podrá estar ociosa para otros lotes hasta que no termine todo el lote anterior. Para casos en donde el tiempo de procesado de la máquina anterior sea superior que en la máquina transferida originará tiempos de espera entre unas piezas transferidas como se dispuso en secciones anteriores pero aun así la mejora está garantizada.

La razón de seguir planteando los modelos sin lote de transferencia es que si finalmente dan resultados dentro de los tiempos límites, será preferible evitar el lote de transferencia unitario ya que se necesitaría estudiar el transporte en taller de manera más profunda que si existieran transportes de lotes completos.

Por otro lado debido al aumento de complejidad del modelo a la hora de plantear las restricciones no se ha podido reducir las variables temporales a una dimensión ya que se necesita tener un control del orden de las piezas dentro del lote completo. También se vuelve un modelo difícil de generalizar respecto a sus antecesores ya que cada tamaño de la matriz de salidas de las variables (2 dimensiones) lo define el tamaño del lote máximo entre todos los lotes del horizonte como veremos a continuación.

### 5.3.2.1 Modelo MILP de lote de transferencia unitario para monoruta

- *Índices*
  - Número de productos  $i = (1..18)$
  - Número de máquinas  $k = (1..9)$
  - Número de operación  $r, r' = (1..26)$
  - Número de piezas dentro de un lote  $d, d' = (1..56)$
- *Conjuntos*
  - Conjunto de trabajos que pertenecen a la pieza  $i$ ;  $P_i$
  - Conjunto de operaciones que son procesadas en la máquina  $k$ ;  $M_k$
  - Conjunto de demandas en función de la pieza  $i$ ;  $D_i$
- *Datos del problema*
  - $t_{rd}$  tiempo de procesado de la pieza  $d$  de la operación  $r$ .
  - $M$  número muy alto.
  - $E$  número muy pequeño.
- *VARIABLES DE DECISIÓN*
  - $s_{rd}$  tiempo de inicio de la pieza  $d$  en la operación  $r$ .
  - $c_{rd}$  tiempo de terminación de la pieza en la operación  $r$ .
  - $C_{max}$  máximo tiempo de finalización de todas las operaciones.

- $Y_{rr'}$  Variable binaria que será 1 si la operación  $r$  va antes en la máquina (no tiene porqué preceder) que la operación  $r'$  y 0 si no.

$$\text{Min } C_{max} + E * \sum_{r=1}^{26} \sum_{d=1}^{56} c_{rd}$$

s.a

$$c_{rd} = s_r + t_{rd} \quad \forall r; \forall d \in D_i$$

[1]

$$s_{r'd} \geq c_{rd} \quad \forall r' = r + 1 : (r, r') \in P_i; \forall d \in D_i$$

[2]

$$s_{rd'} \geq c_{rd} \quad \forall d' = d + 1 : (d, d') \in P_i; \forall r \in P_i$$

[3]

$$s_{r1} \geq c_{r'56} - M * Y_{rr'} \quad \forall r > r' : (r, r') \in M_k$$

[4]

$$s_{r'1} \geq c_{r56} - M * (1 - Y_{rr'}) \quad \forall r > r' : (r, r') \in M_k$$

[5]

$$C_{max} \geq c_{rd} \quad \forall r; \forall d \in D_i$$

[6]

Cuyas variables:

$$s_{rd} \geq 0 \quad \forall (r, r'); \forall (d, d')$$

$$c_{rd} \geq 0 \quad \forall (r, r'); \forall (d, d')$$

$$C_{max} \geq 0$$

$$Y_{rr'} \in \{0,1\} \quad \forall r > r' : (r, r') \in M_k$$

*Descripción de restricciones y función objetivo.*

En la función objetivo ha de añadirse a la suma de todos los tiempos de finalización, la suma de todos los tiempos de finalización de sus piezas unitarias, ya que se tienen dos dimensiones.

En la restricción [1] busca relacionar el instante de terminación de una pieza  $d$  en el lote  $r$  por medio del tiempo de procesado en la máquina que le corresponda  $t_{rd}$ , a diferencia de los modelos posteriores no se van a considerar diferentes instantes de inicio para el set-up y el procesado respectivamente para reducir la carga computacional. En lugar de ello se le ha añadido el tiempo de set-up a la primera de todas las piezas de todos los lotes.

La restricción [2] busca solventar la trazabilidad de una pieza conforme pasa por las máquinas de su secuencia de procesado. Impedirá que una pieza  $d$  de una operación  $r$  no comience antes de terminar en su máquina posterior, restricción necesaria al haber individualizado las piezas.

La restricción [3] consigue el procesado en correcto orden de todas las piezas  $d$  de una operación  $r$ . De manera que una pieza nunca podrá comenzar hasta que su predecesora esté totalmente procesada.

Las restricciones [4] y [5] se enfocan en la relación entre operaciones diferentes dentro de una máquina. La principal diferencia entre los modelos anteriores es que considera solo la primera y última pieza de cada operación  $r$  para relacionarse con las otras operaciones y decidir el orden en máquina. Gracias a la restricción [3] todas las piezas  $d$  se comportarán correctamente. De manera que como si se tratara de una operación compacta como anteriormente, la variable  $Y_{rr'}$  decide que grupo de piezas va antes. A pesar de ser un problema con variables bidimensionales se consigue reducirla a una dimensión.

La restricción [6] busca darle el máximo valor a  $C_{max}$  de todos los tiempos de finalización.

Todo esto es posible gracias a que se considera que todos los pedidos tienen la misma demanda, 56 que es la máxima demanda de todos los pedidos, de manera que tendremos una matriz de tiempos uniforme. Para poder diferenciar las demandas reales de todos los pedidos simplemente creamos una matriz de tiempos donde cuando se llegue a la demanda real del pedido el resto de piezas tengan un tiempo de procesado 0.

De esa manera ganamos simplicidad de restricciones y variables a cambio de una matriz de datos algo compleja de procesar.

### 5.3.2.2 Modelo MILP de lote de transferencia unitario para multiruta.

De igual manera la distribución multiruta sufre solo ligeros cambios en cuestión de demanda máxima y número de operaciones, las cuales gracias al reparto de lotes conseguiremos una menor demanda mínima pero tendremos un mayor número de trabajos. Los índices quedarían de la siguiente manera:

- *Índices*

- Número de productos  $i = (1..18)$
- Número de máquinas  $k = (1..9)$
- Número de operación  $r, r' = (1..49)$
- Número de piezas dentro de un lote  $d, d' = (1..46)$

$$\text{Min } C_{max} + E * \sum_{r=1}^{49} \sum_{d=1}^{46} c_{rd}$$

*s.a*

$$c_{rd} = s_r + t_{rd} \quad \forall r; \forall d \in D_i$$

[1]

$$s_{r'd} \geq c_{rd} \quad \forall r' = r + 1 : (r, r') \in P_i; \forall d \in D_i$$

[2]

$$s_{rd'} \geq c_{rd} \quad \forall d' = d + 1 : (d, d') \in P_i; \forall r \in P_i$$

[3]

$$s_{r1} \geq c_{r'46} - M * Y_{rr'} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[4]

$$s_{r'1} \geq c_{r46} - M * (1 - Y_{rr'}) \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

[5]

$$C_{max} \geq c_{rd} \quad \forall r; \forall d \in D_i$$

[6]

*Cuyas variables:*

$$s_{rd} \geq 0 \quad \forall (r, r'); \forall (d, d')$$

$$c_{rd} \geq 0 \quad \forall (r, r'); \forall (d, d')$$

$$C_{max} \geq 0$$

$$Y_{rr'} \in \{0,1\} \quad \forall r > r': (r, r') \in M_k$$

Como se puede apreciar solo los parámetros que tenían que ver con la demanda ha cambiado en el modelo, tanto en la función objetivo como en las restricciones [4] y [5] que dependían de la longitud de la demanda para ser planteadas.

# 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

En esta sección se presentarán todos los resultados conseguidos de la resolución de los modelos planteados y explicados en la sección anterior, en el Anexo I se encuentran todos los códigos LINGO que han sido utilizados para plasmar los modelos, en el CD-ROM que se aportará con el proyecto estarán los archivos LINGO de igual manera. Debido a la cantidad de datos que se proporcionan, para algunos de los modelos que se van a resolver en esta sección no será posible disponer de diagramas de Gantt que puedan facilitar el análisis. Al igual que [Romo de Vivar, 2015] en su proyecto se dividirán los resultados en diferentes escenarios:

- **Ejemplo 1:** Se presentará un caso simple el cual es resuelto con el modelo de lote completo. El objetivo de este ejemplo es validar el correcto funcionamiento del modelo antes planteado en un entorno más reducido en donde se aplica un diagrama de Gantt. Será resuelto en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.
- **Ejemplo 2:** Se presentará el mismo enunciado que el ejemplo 1 pero esta vez aplicando el modelo de lote de transferencia unitario. De igual manera el objetivo es la validación del correcto funcionamiento del modelo para poder escalarlo al entorno real. Será representado de igual manera con diagrama de Gantt. Será resuelto en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.
- **Escenario 1:** En él se analizará el modelo de lote completo monoruta que se presentó en la sección anterior. La presentación de los resultados se hará analizando las secuencias  $\pi_k$  y el marco de tiempos de inicio, fin de todas las operaciones para cada producto y con un diagrama de Gantt. Se resolverá en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.
- **Escenario 2:** Se resolverá el modelo de lote completo multiruta que se presentó en la sección anterior. La presentación de los datos se realizará de igual manera respecto al escenario 1, pero haciendo hincapié en la distribución de rutas. Se resolverá en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.
- **Escenario 3:** Se resolverá el modelo de lote de transferencia monoruta unitario que se presentó en la sección anterior. La presentación de los datos se realizará de manera agregada y desagregada, por un lado a nivel operación y por otro a nivel pieza. Se resolverá en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.
- **Escenario 4:** Se resolverá el modelo de lote de transferencia multiruta unitario que se presentó en la sección anterior. La presentación se hará de igual manera que en el escenario anterior

diferenciando entre operaciones, piezas y rutas. Se resolverá en LINGO 10 y generará un fichero de texto con los resultados.

- **Escenario 4: Análisis del modelo**, Se presentarán dos modelos en dos apartados que buscarán reducir la complejidad del escenario 4, uno de ellos debe mantener los valores de la función objetivo y el otro buscará mejorar la función objetivo. Se resolverá de igual manera con LINGO 10 y generarán ficheros con los resultados.
- **Escenario comparativo**. En él se contrastarán todos los resultados obtenidos por los escenarios y se analizarán posibles mejoras y alternativas a los modelos existentes. Se intentará encontrar cuales son los factores más determinantes en el modelo en razón de su objetivo y complejidad.

El ordenador utilizado para resolver todos los modelos es un portátil ASUS cuyo procesador es un Intel® Core™ i5-3337U CPU@ 1.80GHz. Como se ha resaltado anteriormente el algoritmo de resolución elegido es Branch-&-Bound.

## 6.1 MODELO DE PEQUEÑA ESCALA.

Antes de pasar a describir los resultados de los diferentes escenarios es necesario plantear los datos que el escenario de prueba va a utilizar para validar los dos modelos planteados en la sección anterior.

En el escenario de prueba se utilizará un modelo de 4 máquinas con 4 pedidos, cada uno de ellos con una ruta de dos máquinas. A continuación se presenta la tabla de datos.

| Máquinas. | Op. 1 | Op. 2 |
|-----------|-------|-------|
| Prod.1    | 2     | 1     |
| Prod.2    | 3     | 2     |
| Prod.3    | 1     | 4     |
| Prod.4    | 3     | 4     |

Tabla 6-1. Necesidad de máquinas para ejemplos

| Maqu.  | Demanda | Op. 1  | Op. 2  |
|--------|---------|--------|--------|
| Prod.1 | 3       | 23/69  | 10/30  |
| Prod.2 | 5       | 32/160 | 47/235 |
| Prod.3 | 4       | 19/76  | 43/172 |
| Prod.4 | 3       | 39/117 | 6/18   |

Tabla 6-2 Tiempos de procesado y demandas de las operaciones para ejemplos

La segunda cifra de los campos de tiempo procesado es resultante del producto de la demanda del producto por el tiempo de procesado de esa operación, de manera que los datos siguen la estructura de tiempo unitario/ tiempo total.

| Nº Oper | Op. 1 | Op. 2 |
|---------|-------|-------|
| Prod.1  | 1     | 2     |
| Prod.2  | 3     | 4     |
| Prod.3  | 5     | 6     |
| Prod.4  | 7     | 8     |

Tabla 6-3 Índice r de operación para ejemplos

| Tiem. Setup | Op. 1 | Op. 2 |
|-------------|-------|-------|
| Prod.1      | 1     | 2     |
| Prod.2      | 2     | 1     |
| Prod.3      | 3     | 2     |
| Prod.4      | 1     | 1     |

Tabla 6-4 Tiempos de set-up de las operaciones para ejemplos

Como se puede apreciar el problema tiene todos los elementos que se han visto en los escenarios reales en una escala mucho más reducida y manejable.

### 6.1.1 ELEMPLIO 1

Datos de interés del modelo:

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Variables            | 90(64)                 |
| Restricciones        | 38                     |
| Tiempo de resolución | 1 s                    |
| Inviabilidad         | 1,407x10 <sup>-7</sup> |
| Iteraciones          | 43                     |
| Objetivo             | 398,017                |

Tabla 6-5 Datos de interés de Ejemplo 1

Las **variables** indican el número de total de variables de decisión que ha generado el problema y entre paréntesis están las variables que han tomado valores enteros de todas ellas. Las **restricciones** indican cuantas restricciones han generado los conjuntos tras la resolución del modelo. El **tiempo de resolución** es el tiempo total que ha tardado el modelo en resolverse. La **inviabilidad** es una medida de invalidez que tiene la solución resultante del modelo, valores bajos serán preferibles. El campo **iteraciones** se refiere al número de veces que el software ha necesitado ser ejecutado para encontrar la solución. El **objetivo** es el valor del objetivo óptimo, suma del máximo tiempo de finalización y la suma de todos los tiempos de finalización.

| $\pi_k$   | Secuencia |   |
|-----------|-----------|---|
| Máquina 1 | 1         | 3 |
| Máquina 2 | 1         | 2 |
| Máquina 3 | 2         | 4 |
| Máquina 4 | 3         | 4 |

Tabla 6-6 Secuencias en máquinas de Ejemplo 1

En la tabla anterior se presentan el orden temporal en el que van las operaciones en las máquinas, por ejemplo el  $\pi_3 = [2,4]$ .

| Tiempos | Máquina nº1 |            |     | Máquina nº2 |            |        |
|---------|-------------|------------|-----|-------------|------------|--------|
|         | Inicio      | Fin set-up | Fin | Inicio      | Fin set-up | Fin    |
| Pieza 1 | 0           | 1          | 70  | 79          | 81         | 111    |
| Pieza 2 | 0           | 2          | 162 | 162         | 163        | 398(*) |
| Pieza 3 | 0           | 3          | 79  | 79          | 81         | 253    |
| Pieza 4 | 162         | 163        | 280 | 280         | 281        | 299    |

Tabla 6-7 Tiempos de inicio, set-up y finalización de Ejemplo 1

En la tabla anterior se presentan todos los tiempos de inicio y fin de cada operación según la pieza, tanto para la primera máquina que ha de pasar como para la segunda. También incluye los tiempos de inicio reales tras la preparación de la máquina. La cifra marcada con asterisco indica el máximo tiempo de finalización del problema.

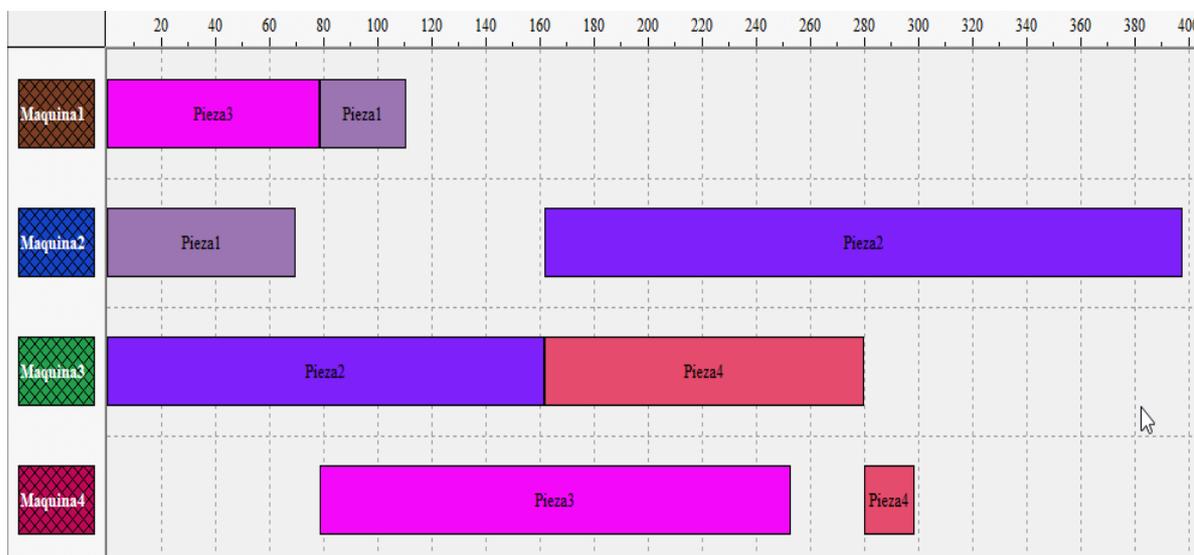


Ilustración 12 Diagrama de Gantt de Ejemplo 1

El diagrama de Gantt es la mejor forma para analizar de primera mano si se han respetado las restricciones que se han impuesto al modelo correctamente. El software LEKIN no permite introducir los valores del problema sino que se introducen los datos de máquinas, piezas, rutas y tiempos de procesado y da la opción de usar un cálculo manual del diagrama, dándole los órdenes de procesado en las máquinas de cada una de las piezas y eligiendo la opción de objetivo. Como se puede observar comparando con la tabla 6-7 los tiempos coinciden a

la perfección, las diferentes operaciones de cada pieza no se montan unas con otras al igual que entre las operaciones a nivel máquina. Es por ello que se puede determinar que se puede validar el correcto funcionamiento del modelo de lote completo.

### 6.1.2 EJEMPLO 2

Como se ha comentado anteriormente, este ejemplo está enfocado a validar el modelo de lote de transferencia unitario, para ello se utilizará el mismo problema de pequeña escala antes resuelto para el caso de lote completo y así poder hacer una pequeña comparación de ambos enfoques de transferencia. En este caso se usarán las cifras de tiempo de procesamiento individuales.

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| Variables            | 154(64)       |
| Restricciones        | 142           |
| Tiempo de resolución | 1 s           |
| Inviabilidad         | 2,36937x10-14 |
| Iteraciones          | 352           |
| Objetivo             | 306,06        |

Tabla 6-8 Datos de interés de Ejemplo 2

| $\pi_k$   | Secuencia |   |
|-----------|-----------|---|
| Máquina 1 | 1         | 3 |
| Máquina 2 | 1         | 2 |
| Máquina 3 | 2         | 4 |
| Máquina 4 | 3         | 4 |

Tabla 6-9 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2

| Tiempos | Máquina n°1 |            |     | Máquina n°2 |            |        |
|---------|-------------|------------|-----|-------------|------------|--------|
|         | Inicio      | Fin set-up | Fin | Inicio      | Fin set-up | Fin    |
| Pieza 1 | 0           | 1          | 70  | 79          | 81         | 111    |
| Pieza 2 | 0           | 2          | 162 | 70          | 71         | 306(*) |
| Pieza 3 | 0           | 3          | 79  | 22          | 24         | 196    |
| Pieza 4 | 162         | 163        | 280 | 202         | 203        | 286    |

Tabla 6-10 Tiempos de inicio, set-up y finalización de Ejemplo 2

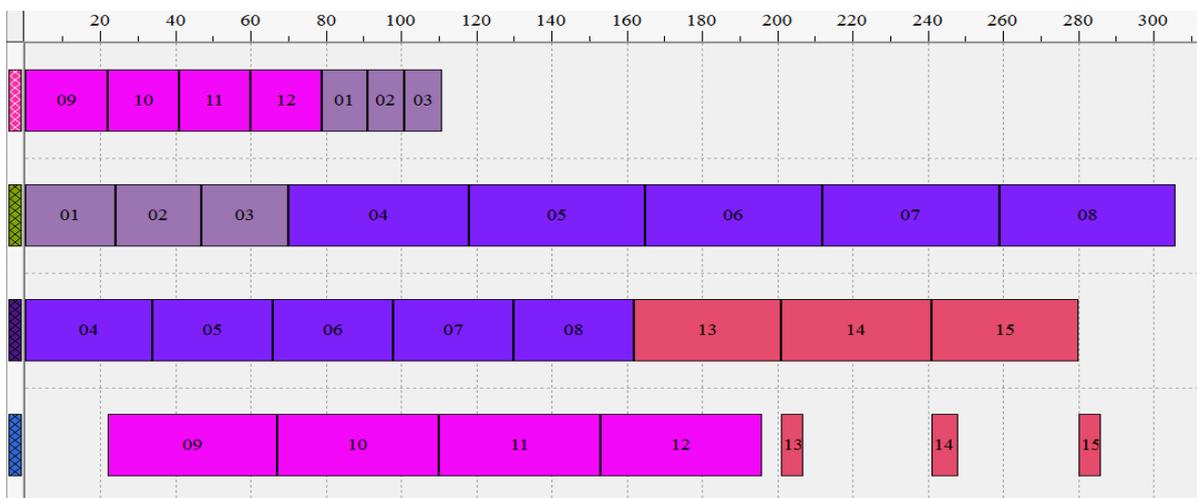
Como apartado nuevo se debe añadir la información de los inicios y terminaciones de cada una de las piezas que forman parte de los lotes completos u operaciones. Para ello se usarán las propias salidas al documento de texto que se ha programado en LINGO. Cada salida de dato indica  $n^{\circ}$  pieza/comienzo/finalización:

- Para la pieza 1, máquina 2:

1|0/24 2|24/47 3|47/70

- Para la pieza 1, máquina 1:  
1|79/91 2|91/101 3|101/111
- Para la pieza 2, máquina 3:  
1|0/34 2|34/66 3|66/98 4|98/130 5|130/162
- Para la pieza 2, máquina 2:  
1|70/118 2|118/165 3|165/212 4|212/259 5|259/306
- Para la pieza 3, máquina 1:  
1|0/22 2|22/41 3|41/60 4|60/79
- Para la pieza 3, máquina 4:  
1|22/67 2|67/110 3|110/153 4|153/196
- Para la pieza 4, máquina 3:  
1|162/202 2|202/241 3|241/280
- Para la pieza 4, máquina 4:  
1|202/209 2|241/247 3|280/286

Como se puede apreciar a pesar de haber tardado lo mismo en resolver el modelo las iteraciones, restricciones y variables han aumentado en cantidad debido a las dimensiones de las variables de decisión. Por otro lado lo más llamativo es la reducción del tiempo máximo de finalización en 92 minutos, lo que hace atractivo la práctica del lote de transferencia unitario, sin embargo hay que tener siempre que esa cifra aumentaría si se le añadiera los tiempos continuos de transporte que supondría.



*Ilustración 13 Diagrama de Gantt de Ejemplo 2*

Debido al software se han nombrado las piezas por separado, los lotes conservan los mismos colores que el Ejemplo 1, se presenta una tabla explicativa por número de piezas:

|         |                |
|---------|----------------|
| Pieza 1 | 01,02,03       |
| Pieza 2 | 04,05,06,07,08 |
| Pieza 3 | 09,10,11,12    |
| Pieza 4 | 13,14,15       |

Tabla 6-11 Relación pieza-demandas Ejemplo 2

Comparando el diagrama de Gantt del caso de lote de transferencia unitario y los tiempos calculados por el modelo todo coincide, ninguna restricción de tiempos es violada tal y como se ve en el diagrama. El modelo de lote de transferencia unitario funciona correctamente.

Para el caso de la pieza 4 se puede apreciar el fenómeno algo indeseable ocurrido en los lotes de transferencia que ya se comentó con anterioridad, la máquina 4 procesa operaciones de poca duración y espera largos tiempos muertos para la siguiente operación del lote de piezas 4. Este fenómeno suele ocurrir entre los últimos lotes del modelo, cuando las máquinas están más libres y la primera estación de la pieza 4 no comienza hasta el instante 162 por lo que el fenómeno estaba asegurado. Un mejor equilibrado de carga puede ser una opción para estos casos, también sería válido hacer un análisis previo al modelo para definir un tamaño de lote transferencia más grande de cara a poder proporcionar un colchón de tiempos más amplio a la máquina 4 y por último se podría aplicar lo introducido en la sección de notación y conceptos. Por otro lado se observa que el lote de transferencia funciona muy fluido con las piezas 2 y 3 (en la pieza 1 no se produce lote de transferencia).

Otra de las grandes mejoras respecto al modelo de lote completo son los tiempos de espera, en el Ejemplo 1 hay un total de 198 minutos de espera en máquinas mientras que en el Ejemplo 2 se tienen 99 minutos de espera.

## 6.2 ESCENARIO 1, MONORUTA DE LOTE COMPLETO

En este escenario como ya se ha comentado se presentan los resultados y análisis del modelo de lote completo para el caso monoruta, lo que significará tener tan solo una ruta por tipo de pieza. Los resultados serán plasmados con una estructura similar a los anteriores pero con ciertos cambios de cara a una mejor visualización de un número bastante mayor de datos.

*Datos de interés:*

|                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| Variables            | 756(676)                  |
| Restricciones        | 174                       |
| Tiempo de resolución | 3 s                       |
| Inviabilidad         | $2,27374 \times 10^{-13}$ |
| Iteraciones          | 94940                     |
| Objetivo             | 2733,37                   |

Tabla 6-12 Datos de interés de Escenario 1.

Para poder determinar la secuencia de trabajos se le ha añadido al código LINGO de este modelo aparte del informe de texto de los tiempos de inicio de set-up, inicio de operación y finalización de operación distribuidos por piezas como se pudo ver en el Ejemplo 1, otro enfocados por máquinas.

|           |         |         |         |         |       |         |        |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|
| <b>M1</b> | 13 (9)  |         |         |         |       |         |        |
| <b>M2</b> | 26 (18) | 23 (15) | 19 (12) | 24 (16) | 7 (5) | 15 (10) | 10 (7) |
| <b>M3</b> | 16 (11) | 6 (5)   | 20 (13) | 5 (4)   | 3 (2) |         |        |
| <b>M4</b> | 22 (14) |         |         |         |       |         |        |
| <b>M5</b> | 25 (17) | 12 (8)  | 9 (6)*  |         |       |         |        |
| <b>M6</b> | 18 (12) | 17 (11) | 21 (13) | 2 (1)   |       |         |        |
| <b>M7</b> | 11 (8)  | 14 (10) | 4 (3)   |         |       |         |        |
| <b>M8</b> | 8 (6)   |         |         |         |       |         |        |
| <b>M9</b> | 1 (1)   |         |         |         |       |         |        |

Tabla 6-13 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2

Como se puede apreciar la tabla resultante es bastante similar a las vistas en la sección anterior solo que ahora las operaciones no están ordenadas de mayor a menor sino con el orden  $\pi_k$  que ha calculado el modelo en LINGO. Marcado con un asterisco, se encuentra el trabajo que supone el máximo tiempo de finalización.

Para presentar los tiempos de procesado de cada una de las operaciones de cada lote se vuelve algo difícil formar una tabla ya que la cantidad de datos es bastante superior, es por ello que se usará la salida de datos de texto de los tiempos para cada tipo de pieza. La estructura de presentación de tiempos es la siguiente; *instante de inicio de procesado; instante de inicio de set-up/instante de finalización*:

- **Para la pieza 1:**  
Operación 1 7;0/1479.5    Operación 2 1693;1687/2654
- **Para la pieza 2:**  
Operación 3 1840 ; 1834/2260
- **Para la pieza 3:**  
Operación 4 1177 ; 1171/2177
- **Para la pieza 4:**  
Operación 5 1434 ; 1429/1834
- **Para la pieza 5:**  
Operación 6 665 ; 653/1085    Operación 7 1116.4 ; 1112.4/1366.4
- **Para la pieza 6:**  
Operación 8 5 ; 0/1880    Operación 9 1883 ; 1880/2733(\*)
- **Para la pieza 7:**  
Operación 10 1742.4 ; 1731.4/2242.4
- **Para la pieza 8:**

- Operación 11 5 ; 0/725    Operación 12 728 ; 725/1772
- **Para la pieza 9:**  
Operación 13 8 ; 0/2192
  - **Para la pieza 10:**  
Operación 14 730 ; 725/1171    Operación 15 1371.4 ; 1366.4/1731.4
  - **Para la pieza 11:**  
Operación 16 9 ; 0/653    Operación 17 658 ; 653/1498
  - **Para la pieza 12:**  
Operación 18 11 ; 0/193    Operación 19 269.8 ; 264.8/647.8
  - **Para la pieza 13:**  
Operación 20 1100 ; 1085/1429    Operación 21 1498 ; 1498/1687
  - **Para la pieza 14:**  
Operación 22 19 ; 0/2143
  - **Para la pieza 15:**  
Operación 23 140 ; 130/264.8
  - **Para la pieza 16:**  
Operación 24 652.8 ; 647.8/1112.4
  - **Para la pieza 17:**  
Operación 25 19 ; 0/294
  - **Para la pieza 18:**  
Operación 26 4 ; 0/130

Marcados se encuentran los tiempos de finalización de las operaciones que son últimas en cada una de las máquinas exceptuando una de ellas que está marcada con un asterisco, que es el máximo tiempo de finalización,  $C_{max}$ .

A continuación se presenta el diagrama de Gantt resultante de la resolución del modelo. Se observan los grandes desequilibrios entre duraciones de procesado en las máquinas y por ello no son colocados más de dos lotes en ellas. Por otro lado se puede observar que se incurren pocos tiempos muertos aunque las máquinas 5 y 6 tienen grandes esperas tras sus primeras operaciones. Para poder representar este diagrama se ha tenido que vencer ciertas taras que tiene el software LEKIN, por un lado no se le pueden introducir tiempos de procesado superiores a 999 y por otro solo acepta valores enteros del mismo. Para poder solucionarlo se ha tenido que reducir todo el conjunto de tiempos un 55% y haber redondeado los mismos. Para su mejor comprensión se ha actualizado la línea temporal superior.

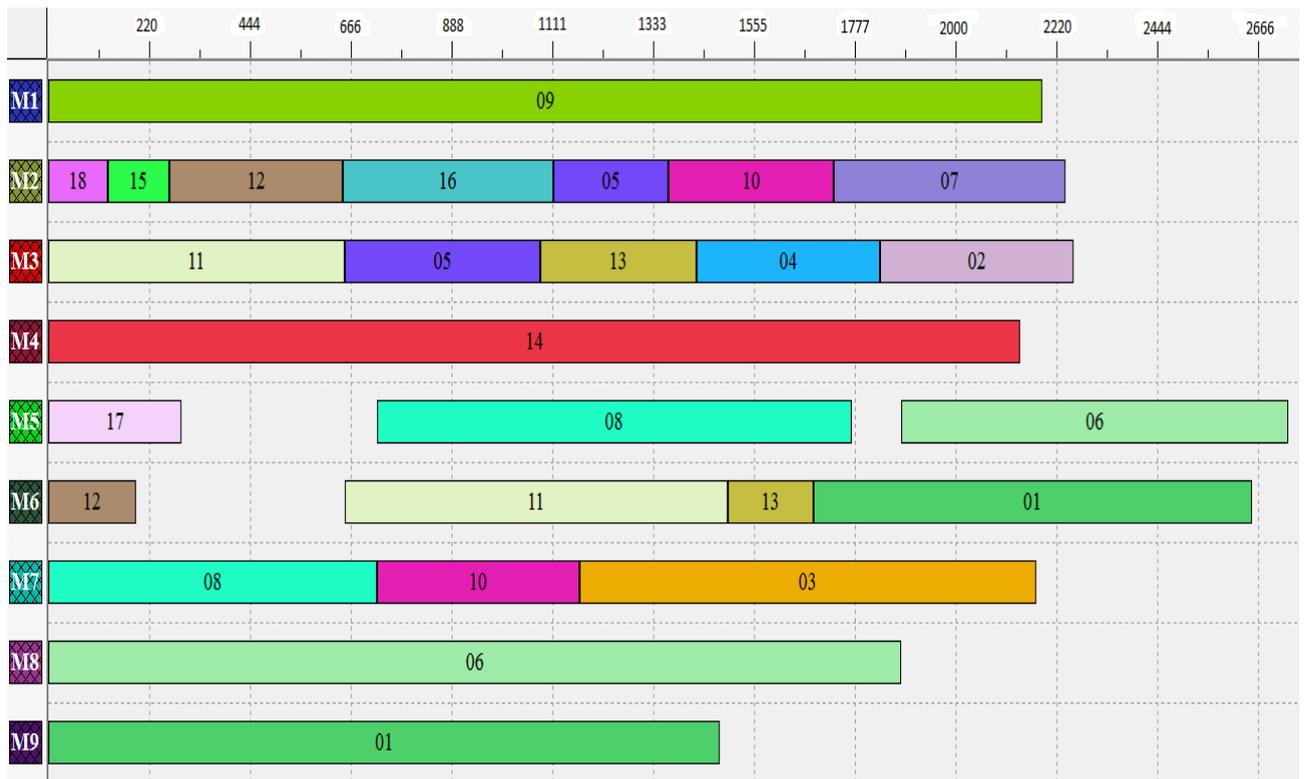


Ilustración 14 Diagrama de Gantt para el modelo monoruta sin lote de transferencia

Ahora para poder analizar la viabilidad del modelo se ha de comparar con los límites de carga disponible en la frontera semanal. Para ello se recogerán cada uno de los máximos tiempos de finalización por máquina,  $C_{\max k}$  y se compararán con los límites.

| Estación    | Escenario 1 | Límite de carga | Desviación    |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|
| Máquina 1   | 2192        | 2200,00         | -8,00         |
| Máquina 2   | 2242,4      | 2290,00         | -47,60        |
| Máquina 3   | 2260        | 2290,00         | -30,00        |
| Máquina 4   | 2143        | 2200,00         | -57,00        |
| Máquina 5   | 2733        | 2200,00         | <b>533,00</b> |
| Máquina 6   | 2654        | 2200,00         | <b>454,00</b> |
| Máquina 7   | 2177        | 2200,00         | -23,00        |
| Máquina 8   | 1880        | 1880,00         | 0,00          |
| Máquina 9   | 1479,5      | 1585,00         | -105,50       |
| Carga media | 2195,66     | 2116,11         |               |
| Carga total | 19760,9     | 19045,00        |               |

Tabla 6-14 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 1.

Como se puede observar no son muchas las desviaciones positivas respecto de las cargas límites pero hay dos máquinas, la 5 y la 6 que se encuentran marcadas, que son las únicas que sobrepasan los límites. Estas dos máquinas sobrepasan los límites en 533 y 454 minutos respectivamente, cifras que son alarmantes ya que

significaría que el taller debería funcionar alrededor 9 horas más, casi una jornada laboral entera. Es por ello que se debe seguir explorando las soluciones que aportan el resto de modelos que presumiblemente y como se ha podido ver, serán más eficientes.

### 6.3 ESCENARIO 2, MULTIRUTA DE LOTE COMPLETO

En este escenario se van a presentar los resultados y análisis de la viabilidad del modelo descrito en la sección anterior para el modelo multiruta para lotes completos. Todos los tipos de pieza tendrán una ruta alternativa que no tiene por qué tener pasar demanda por ella y por tanto estar “activadas”.

*Datos de interés:*

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| Variables            | 2550(2401)    |
| Restricciones        | 552           |
| Tiempo de resolución | 35s           |
| Inviabilidad         | 4,57976x10-14 |
| Iteraciones          | 1950246       |
| Objetivo             | 2368,3        |

Tabla 6-15 Datos de interés de Escenario 2.

Se puede apreciar que el número de variables, restricciones e iteraciones ha crecido considerablemente, aunque el tiempo de resolución sea pequeño se ha de tener en cuenta que también ha crecido respecto a los modelos anteriores. Por último el objetivo ha bajado también moderadamente respecto al modelo monoruta.

La siguiente tabla de secuencias de operaciones en cada máquina se va a completar obviando las rutas que no se utilizan, a pesar de que el modelo las contempla y las coloca al comienzo de todas las máquinas con tiempos nulos. La estructura de presentación es similar solo que ahora ha sido añadido entre paréntesis *pieza..ruta*

| $\pi_k$ | Secuencia    |              |              |              |              |              |              |                             |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| M1      | 3<br>(1.2)   | 22<br>(9.1)  |              |              |              |              |              |                             |
| M2      | 7<br>(3.2)   | 41<br>(14.2) | 39<br>(13.2) | 23<br>(9.2)  | 21<br>(8.2)  | 44<br>(16.1) | 31<br>(11.2) | 33<br>(12.1)                |
| M3      | 26<br>(10.2) | 20<br>(8.2)  | 28<br>(11.1) | 8<br>(4.1)   | 4<br>(2.1)   |              |              |                             |
| M4      | 15<br>(6.2)  | 12<br>(5.2)  | 40<br>(14.1) |              |              |              |              |                             |
| M5      | 46<br>(17.1) | 19<br>(8.1)  | 14<br>(6.1)  |              |              |              |              |                             |
| M6      | 17<br>(7.2)  | 47<br>(17.2) | 43<br>(15.2) | 49<br>(18.2) | 29<br>(11.1) | 32<br>(12.1) | 27<br>(10.2) | <b>2(*)</b><br><b>(1.1)</b> |
| M7      | 38<br>(13.2) | 30<br>(11.2) | 18<br>(8.1)  | 6<br>(3.1)   |              |              |              |                             |

|    |             |  |  |  |  |  |  |  |
|----|-------------|--|--|--|--|--|--|--|
| M8 | 13<br>(6.1) |  |  |  |  |  |  |  |
| M9 | 1<br>(1.1)  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabla 6-16 Secuencias en máquinas de Ejemplo 2

El número máximo de piezas cargadas en las máquinas sigue siendo el mismo aunque aumentan las operaciones cargadas a la máquina 6, una de las que superaban en límite de carga de máquinas. Marcada con un asterisco se encuentra indicada la operación que contiene el máximo tiempo de operación.

- Para la **pieza 1 ruta 1:**  
Trabajo 1 7 ; 0/1432 Trabajo 2 1438 ; 1432/2368(\*)
- Para la **pieza 1 ruta 2:**  
Trabajo 3 10 ; 0/40
- Para la **pieza 2 ruta 1:**  
Trabajo 4 947 ; 941/1367
- Para la **pieza 3 ruta 1:**  
Trabajo 6 811 ; 805/1691
- Para la **pieza 3 ruta 2:**  
Trabajo 7 5 ; 0/71
- Para la **pieza 4 ruta 1:**  
Trabajo 8 541 ; 536/941
- Para la **pieza 5 ruta 2:**  
Trabajo 12 234 ; 227/334
- Para la **pieza 6 ruta 1:**  
Trabajo 13 5 ; 0/1467.5 Trabajo 14 1470.5 ; 1467.5/2133.5
- Para la **pieza 6 ruta 2:**  
Trabajo 15 7 ; 0/227
- Para la **pieza 7 ruta 1:**  
Trabajo 17 0 ; 0/130
- Para la **pieza 8 ruta 1:**  
Trabajo 18 505 ; 500/805 Trabajo 19 808 ; 805/1243
- Para la **pieza 8 ruta 2:**  
Trabajo 20 384.5 ; 381/458 Trabajo 21 637 ; 633/763
- Para la **pieza 9 ruta 1:**  
Trabajo 22 48 ; 40/1842
- Para la **pieza 9 ruta 2:**  
Trabajo 23 463 ; 459/633
- Para la **pieza 10 ruta 2:**  
Trabajo 26 6 ; 0/381 Trabajo 27 824 ; 824/1004
- Para la **pieza 11 ruta 1:**  
Trabajo 28 467 ; 458/536 Trabajo 29 541 ; 536/631

- Para la **pieza 11 ruta 2:**  
Trabajo 3075/500 Trabajo 311227/1407
- Para la **pieza 12 ruta 1:**  
Trabajo 32 642 ; 631/824 Trabajo 33 1412 ; 1407/1790
- Para la **pieza 13 ruta 2:**  
Trabajo 38 5 ; 0/75 Trabajo 39 340 ; 335/459
- Para la **pieza 14 ruta 1:**  
Trabajo 40 353 ; 334/1710
- Para la **pieza 14 ruta 2:**  
Trabajo 41 75 ; 71/335
- Para la **pieza 15 ruta 2:**  
Trabajo 43 164.5 ; 164.5/295.7
- Para la **pieza 16 ruta 1:**  
Trabajo 44 768 ; 763/1227
- Para la **pieza 17 ruta 1:**  
Trabajo 46 19 ; 0/129
- Para la **pieza 17 ruta 2:**  
Trabajo 47 130 ; 130/164.5
- Para la **pieza 18 ruta 2:**  
Trabajo 49 295.7 ; 295.7/454.7

De igual manera han sido marcados todos los trabajos que van en la última posición de las secuencias y aparte con un asterisco el que corresponde al  $C_{max}$ , que le corresponde a la operación 2 en la máquina 6, la cual se había observado que sufría un aumento de carga de trabajos.

Se presenta a continuación el diagrama de Gantt para el caso multiruta. Se han respetado los colores que se tienen para las máquinas y los tipos de pieza a producir para el caso monoruta simplemente se han diferenciado por ruta 1 (.1) y ruta 2 (.2). Las rutas por las que no transcurre ninguna pieza han sido suprimidas del diagrama. Se presenta en la siguiente página de manera expandida.

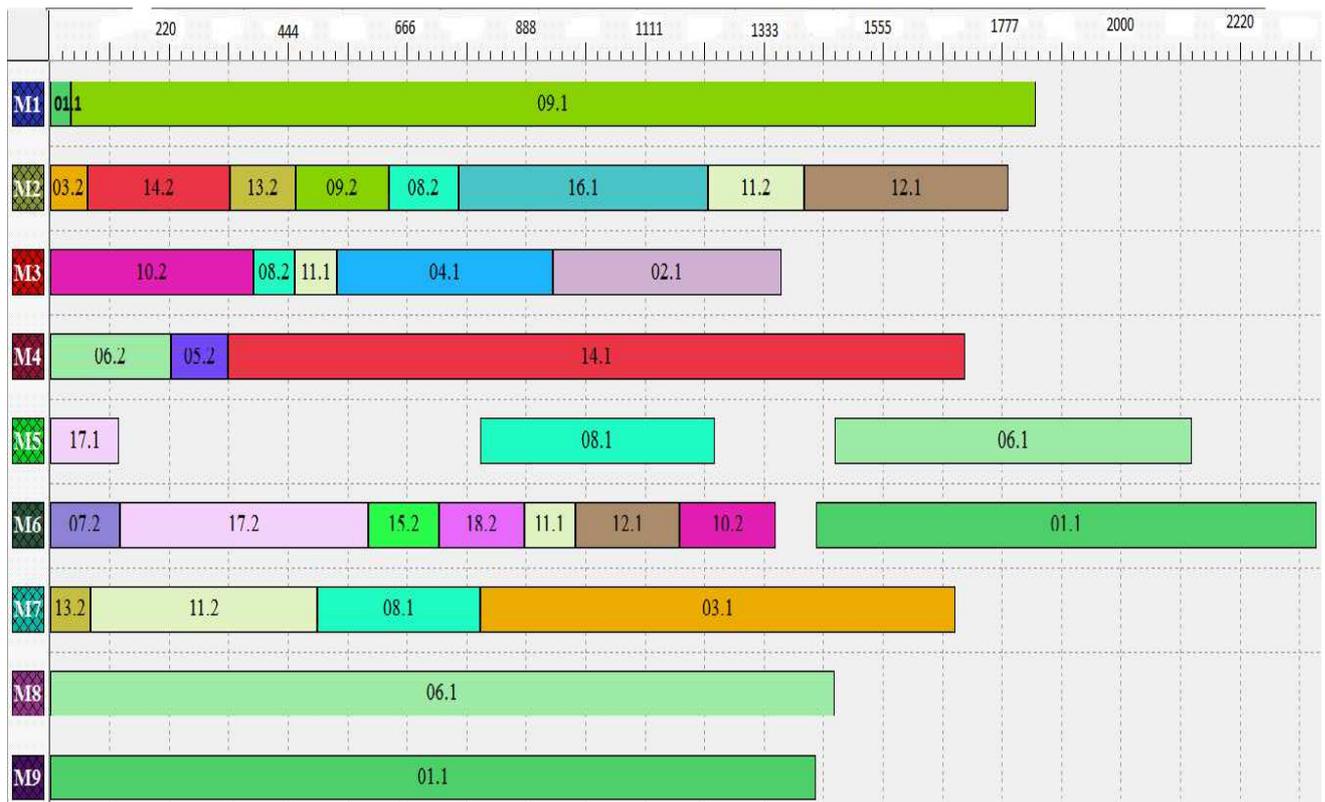


Ilustración 15 Diagrama de Gantt para el modelo multiruta sin lote de transferencia

En este modelo se ha podido observar que su resolución comienza a ser algo más compleja, esta no es la única solución con ese mismo valor de la función objetivo, suele pasar que al tener un valor tan pequeño la suma de todos los tiempos de finalización pierda tolerancia y existan varias opciones, a pesar de tener el mismo valor de la función objetivo. El software acota el valor de la función objetivo a no más de tres decimales.

Ahora se pasará a evaluar la validez de la solución respecto a los límites de carga máximos estipulados en la frontera temporal.

| Estación    | Escenario 1 | Límite de carga | Desviación    |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|
| Máquina 1   | 1842        | 2200,00         | -358,00       |
| Máquina 2   | 1790        | 2290,00         | -500,00       |
| Máquina 3   | 1367        | 2290,00         | -923,00       |
| Máquina 4   | 1710        | 2200,00         | -490,00       |
| Máquina 5   | 2133,5      | 2200,00         | -66,50        |
| Máquina 6   | 2368        | 2200,00         | <b>168,00</b> |
| Máquina 7   | 1691        | 2200,00         | -509,00       |
| Máquina 8   | 1467,5      | 1880,00         | -412,50       |
| Máquina 9   | 1432        | 1585,00         | -153,00       |
| Carga media | 1755,67     | 2116,11         |               |
| Carga total | 15801       | 19045,00        |               |

Tabla 6-17 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 2.

Las mejoras respecto al escenario anterior son notables, tanto que la frontera temporal para la mayoría de las máquinas está infrautilizada y podrían usarse para más pedidos o mayores demandas. Sin embargo la máquina 6 se ha cargado en cantidad como se comentó anteriormente y se observa que sobrepasa del límite en 168 minutos. Es por ello que a pesar de ser mejor opción, no es viable optar por esta distribución de tareas, óptima del modelo que se plantea para este escenario.

## 6.4 ESCENARIO 3, MONORUTA DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO

En este apartado se van a presentar y analizar los resultados obtenidos por el modelo de lote de transferencia unitario para el caso en el se tiene tan solo una ruta por producto, y por lo tanto solo habrá un lote que cubra toda la demanda de ese tipo de pieza. Cabe recordar de nuevo que este modelo y su siguiente multiruta se alejan aún más de ser una abstracción de la realidad debido a los transportes, pero cuanto más holgura se obtenga respecto a las cargas máximas del horizonte más seguridad habrá de aceptar la viabilidad de esta distribución de piezas.

*Datos de interés:*

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Variables            | 3590(676)    |
| Restricciones        | 4878         |
| Tiempo de resolución | 42s          |
| Inviabilidad         | 7,15256x10-8 |
| Iteraciones          | 196281       |
| Objetivo             | 2275,97      |

*Tabla 6-18 Datos de interés de Escenario 3.*

Se ha conseguido un tiempo de resolución asequible para un aumento tan alto de restricciones, se puede observar que el aumento de variables es mucho menor en proporción al resto. La inviabilidad del modelo ha subido respecto a los hasta ahora vistos pero no tiene una cifra considerable.

Se presenta a continuación la tabla de secuencias por máquina, de manera que a pesar de haber transferencia de piezas a nivel unitario se seguirán disponiendo las secuencias por operación completa. Para ello se han creado unas funciones de escritura en LINGO las cuales solo seleccionarán la primera y última pieza del lote. Marcado con un asterisco se encuentra el tiempo de terminación máximo.

| $\pi_k$   | Secuencia |         |         |         |                 |       |        |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----------------|-------|--------|
| <b>M1</b> | 13 (9)    |         |         |         |                 |       |        |
| <b>M2</b> | 26 (18)   | 23 (15) | 19 (12) | 24 (16) | 15 (10)         | 7 (5) | 10 (7) |
| <b>M3</b> | 20 (13)   | 16 (11) | 6 (5)   | 5 (4)   | <b>3(*) (2)</b> |       |        |
| <b>M4</b> | 22 (14)   |         |         |         |                 |       |        |
| <b>M5</b> | 25 (17)   | 12 (8)  | 9 (6)   |         |                 |       |        |
| <b>M6</b> | 18 (12)   | 21 (13) | 17 (11) | 2 (1)   |                 |       |        |

|           |        |         |       |  |  |  |  |
|-----------|--------|---------|-------|--|--|--|--|
| <b>M7</b> | 11 (8) | 14 (10) | 4 (3) |  |  |  |  |
| <b>M8</b> | 8 (6)  |         |       |  |  |  |  |
| <b>M9</b> | 1 (1)  |         |       |  |  |  |  |

Tabla 6-19 Secuencias en máquinas de Ejemplo 3

Para este caso y el siguiente no se han tenido en cuenta los tiempos de set-up de cara a reducir tiempo de computación. Dentro de todas las piezas que conforman un lote, la primera de ellas tendrá un tiempo de procesado mayor, el suyo común con todas las demás y el de set-up, ya que el modelo obliga a que todas ellas sean procesadas a la vez. A continuación se presentan los tiempos por lotes de procesado disgregados por piezas tal y como genera nuestro modelo de LINGO. En primer lugar se muestra el inicio y fin de la operación al completo y la lista completa de inicios y finales de cada una de las piezas del lote enumeradas:

**Para la pieza 1:**

*Operación 1* 0/1479,5

1|0/54,5    2|54,5/102    3|102/149,5    4|149,5/197    5|197/244,5    6|244,5/292    7|292/339,5  
8|339,5/387    9|387/434,5    10|434,5/482    11|482/529,5    12|529,5/577    13|577/624,5    14|624,5/672  
15|672/719,5    16|719,5/767    17|767/814,5    18|814,5/862    19|862/909,5    20|909,5/957  
21|957/1004,5    22|1004,5/1052    23|1052/1099,5    24|1099,5/1147    25|1147/1194,5    26|1194,5/1242  
27|1242/1289,5    28|1289,5/1337    29|1337/1384,5    30|1384,5/1432    31|1432/1479,5

*Operación 2* 1227/2194

1|1227/1264    2|1264/1295    3|1295/1326    4|1326/1357    5|1357/1388    6|1388/1419    7|1419/1450  
8|1450/1481    9|1481/1512    10|1512/1543    11|1543/1574    12|1574/1605    13|1605/1636  
14|1636/1667    15|1667/1698    16|1698/1729    17|1729/1760    18|1760/1791    19|1791/1822  
20|1822/1853    21|1853/1884    22|1884/1915    23|1915/1946    24|1946/1977    25|1977/2008  
26|2008/2039    27|2039/2070    28|2070/2101    29|2101/2132    30|2132/2163    31|2163/2194

**Para la pieza 2:**

*Operación 3* 1834/2260(\*)

1|1834/1852    2|1852/1864    3|1864/1876    4|1876/1888    5|1888/1900    6|1900/1912    7|1912/1924  
8|1924/1936    9|1936/1948    10|1948/1960    11|1960/1972    12|1972/1984    13|1984/1996  
14|1996/2008    15|2008/2020    16|2020/2032    17|2032/2044    18|2044/2056    19|2056/2068  
20|2068/2080    21|2080/2092    22|2092/2104    23|2104/2116    24|2116/2128    25|2128/2140  
26|2140/2152    27|2152/2164    28|2164/2176    29|2176/2188    30|2188/2200    31|2200/2212  
32|2212/2224    33|2224/2236    34|2236/2248    35|2248/2260

**Para la pieza 3:**

*Operación 4* 1171/2177

1|1171/1197    2|1197/1217    3|1217/1237    4|1237/1257    5|1257/1277    6|1277/1297    7|1297/1317  
8|1317/1337    9|1337/1357    10|1357/1377    11|1377/1397    12|1397/1417    13|1417/1437  
14|1437/1457    15|1457/1477    16|1477/1497    17|1497/1517    18|1517/1537    19|1537/1557  
20|1557/1577    21|1577/1597    22|1597/1617    23|1617/1637    24|1637/1657    25|1657/1677  
26|1677/1697    27|1697/1717    28|1717/1737    29|1737/1757    30|1757/1777    31|1777/1797  
32|1797/1817    33|1817/1837    34|1837/1857    35|1857/1877    36|1877/1897    37|1897/1917

38|1917/1937    39|1937/1957    40|1957/1977    41|1977/1997    42|1997/2017    43|2017/2037  
44|2037/2057    45|2057/2077    46|2077/2097    47|2097/2117    48|2117/2137    49|2137/2157  
50|2157/2177

**Para la pieza 4:**

*Operación 5* 1429/1834

1|1429/1474    2|1474/1514    3|1514/1554    4|1554/1594    5|1594/1634    6|1634/1674    7|1674/1714  
8|1714/1754    9|1754/1794    10|1794/1834

**Para la pieza 5:**

*Operación 6* 997/1429

1|997/1051    2|1051/1093    3|1093/1135    4|1135/1177    5|1177/1219    6|1219/1261    7|1261/1303  
8|1303/1345    9|1345/1387    10|1387/1429

*Operación 7* 1477,4/1731,4

1|1477,4/1506,4    2|1506,4/1531,4    3|1531,4/1556,4    4|1556,4/1581,4    5|1581,4/1606,4  
6|1606,4/1631,4    7|1631,4/1656,4    8|1656,4/1681,4    9|1681,4/1706,4    10|1706,4/1731,4

**Para la pieza 6:**

*Operación 8* 1477,4/1731,4

1|0/42,5    2|42,5/80    3|80/117,5    4|117,5/155    5|155/192,5    6|192,5/230    7|230/267,5  
8|267,5/305    9|305/342,5    10|342,5/380    11|380/417,5    12|417,5/455    13|455/492,5    14|492,5/530  
15|530/567,5    16|567,5/605    17|605/642,5    18|642,5/680    19|680/717,5    20|717,5/755  
21|755/792,5    22|792,5/830    23|830/867,5    24|867,5/905    25|905/942,5    26|942,5/980  
27|980/1017,5    28|1017,5/1055    29|1055/1092,5    30|1092,5/1130    31|1130/1167,5    32|1167,5/1205  
33|1205/1242,5    34|1242,5/1280    35|1280/1317,5    36|1317,5/1355    37|1355/1392,5  
38|1392,5/1430    39|1430/1467,5    40|1467,5/1505    41|1505/1543    42|1543/1581    43|1581/1619  
44|1619/1657    45|1657/1695    46|1695/1732,5    47|1732,5/1770,5    48|1770,5/1808    49|1808/1846  
50|1846/1884

*Operación 9* 1341/2194

1|1341/1361    2|1361/1378    3|1378/1395    4|1395/1412    5|1412/1429    6|1429/1446    7|1446/1463  
8|1463/1480    9|1480/1497    10|1497/1514    11|1514/1531    12|1531/1548    13|1548/1565  
14|1565/1582    15|1582/1599    16|1599/1616    17|1616/1633    18|1633/1650    19|1650/1667  
20|1667/1684    21|1684/1701    22|1701/1718    23|1718/1735    24|1735/1752    25|1752/1769  
26|1769/1786    27|1786/1803    28|1803/1820    29|1820/1837    30|1837/1854    31|1854/1871  
32|1871/1888    33|1888/1905    34|1905/1922    35|1922/1939    36|1939/1956    37|1956/1973  
38|1973/1990    39|1990/2007    40|2007/2024    41|2024/2041    42|2041/2058    43|2058/2075  
44|2075/2092    45|2092/2109    46|2109/2126    47|2126/2143    48|2143/2160    49|2160/2177  
50|2177/2194

**Para la pieza 7:**

*Operación 10* 1731,4/2242,4

1|1731,4/1792,4    2|1792,4/1842,4    3|1842,4/1892,4    4|1892,4/1942,4    5|1942,4/1992,4  
6|1992,4/2042,4    7|2042,4/2092,4    8|2092,4/2142,4    9|2142,4/2192,4    10|2192,4/2242,4

**Para la pieza 8:***Operación 11 0/725*

1|0/25 2|25/45 3|45/65 4|65/85 5|85/105 6|105/125 7|125/145 8|145/165 9|165/185  
 10|185/205 11|205/225 12|225/245 13|245/265 14|265/285 15|285/305 16|305/325  
 17|325/345 18|345/365 19|365/385 20|385/405 21|405/425 22|425/445 23|445/465  
 24|465/485 25|485/505 26|505/525 27|525/545 28|545/565 29|565/585 30|585/605  
 31|605/625 32|625/645 33|645/665 34|665/685 35|685/705 36|705/725

*Operación 12 294/1341*

1|294/326 2|326/355 3|355/384 4|384/413 5|413/442 6|442/471 7|471/500 8|500/529  
 9|529/558 10|558/587 11|587/616 12|616/645 13|645/674 14|674/703 15|703/732  
 16|732/761 17|761/790 18|790/819 19|819/848 20|848/877 21|877/906 22|906/935  
 23|935/964 24|964/993 25|993/1022 26|1022/1051 27|1051/1080 28|1080/1109  
 29|1109/1138 30|1138/1167 31|1167/1196 32|1196/1225 33|1225/1254 34|1254/1283  
 35|1283/1312 36|1312/1341

**Para la pieza 9:***Operación 13 0/2192*

1|0/47 2|47/86 3|86/125 4|125/164 5|164/203 6|203/242 7|242/281 8|281/320  
 9|320/359 10|359/398 11|398/437 12|437/476 13|476/515 14|515/554 15|554/593  
 16|593/632 17|632/671 18|671/710 19|710/749 20|749/788 21|788/827 22|827/866  
 23|866/905 24|905/944 25|944/983 26|983/1022 27|1022/1061 28|1061/1100 29|1100/1139  
 30|1139/1178 31|1178/1217 32|1217/1256 33|1256/1295 34|1295/1334 35|1334/1373  
 36|1373/1412 37|1412/1451 38|1451/1490 39|1490/1529 40|1529/1568 41|1568/1607  
 42|1607/1646 43|1646/1685 44|1685/1724 45|1724/1763 46|1763/1802 47|1802/1841  
 48|1841/1880 49|1880/1919 50|1919/1958 51|1958/1997 52|1997/2036 53|2036/2075  
 54|2075/2114 55|2114/2153 56|2153/2192

**Para la pieza 10:***Operación 14 725/1171*

1|725/744,7 2|744,7/759,4 3|759,4/774,1 4|774,1/788,8 5|788,8/803,5 6|803,5/818,2  
 7|818,2/832,9 8|832,9/847,6 9|847,6/862,3 10|862,3/877 11|877/891,7 12|891,7/906,4  
 13|906,4/921,1 14|921,1/935,8 15|935,8/950,5 16|950,5/965,2 17|965,2/979,9 18|979,9/994,6  
 19|994,6/1009,3 20|1009,3/1024 21|1024/1038,7 22|1038,7/1053,4 23|1053,4/1068,1  
 24|1068,1/1082,8 25|1082,8/1097,5 26|1097,5/1112,2 27|1112,2/1126,9 28|1126,9/1141,6  
 29|1141,6/1156,3 30|1156,3/1171

*Operación 15 1112,4/1477,4*

1|1112,4/1129,4 2|1129,4/1141,4 3|1141,4/1153,4 4|1153,4/1165,4 5|1165,4/1177,4  
 6|1177,4/1189,4 7|1189,4/1201,4 8|1201,4/1213,4 9|1213,4/1225,4 10|1225,4/1237,4  
 11|1237,4/1249,4 12|1249,4/1261,4 13|1261,4/1273,4 14|1273,4/1285,4 15|1285,4/1297,4  
 16|1297,4/1309,4 17|1309,4/1321,4 18|1321,4/1333,4 19|1333,4/1345,4 20|1345,4/1357,4  
 21|1357,4/1369,4 22|1369,4/1381,4 23|1381,4/1393,4 24|1393,4/1405,4 25|1405,4/1417,4  
 26|1417,4/1429,4 27|1429,4/1441,4 28|1441,4/1453,4 29|1453,4/1465,4 30|1465,4/1477,4

**Para la pieza 11:**

*Operación 16 334/1227*

1|344/376 2|376/399 3|399/422 4|422/445 5|445/468 6|468/491 7|491/514 8|514/537  
9|537/560 10|560/583 11|583/606 12|606/629 13|629/652 14|652/675 15|675/698  
16|698/721 17|721/744 18|744/767 19|767/790 20|790/813 21|813/836 22|836/859  
23|859/882 24|882/905 25|905/928 26|928/951 27|951/974 28|974/997

*Operación 17 382/1227*

1|382/417 2|417/447 3|447/477 4|477/507 5|507/537 6|537/567 7|567/597 8|597/627  
9|627/657 10|657/687 11|687/717 12|717/747 13|747/777 14|777/807 15|807/837  
16|837/867 17|867/897 18|897/927 19|927/957 20|957/987 21|987/1017 22|1017/1047  
23|1047/1077 24|1077/1107 25|1107/1137 26|1137/1167 27|1167/1197 28|1197/1227

**Para la pieza 12:**

*Operación 18 0/193*

1|0/24 2|24/37 3|37/50 4|50/63 5|63/76 6|76/89 7|89/102 8|102/115 9|115/128  
10|128/141 11|141/154 12|154/167 13|167/180 14|180/193

*Operación 19 264,8/647,8*

1|264,8/296,8 2|296,8/323,8 3|323,8/350,8 4|350,8/377,8 5|377,8/404,8 6|404,8/431,8  
7|431,8/458,8 8|458,8/485,8 9|485,8/512,8 10|512,8/539,8 11|539,8/566,8 12|566,8/593,8  
13|593,8/620,8 14|620,8/647,8

**Para la pieza 13:**

*Operación 20 0/344*

1|0/62 2|62/109 3|109/156 4|156/203 5|203/250 6|250/297 7|297/344

*Operación 21 193/382*

1|193/220 2|220/247 3|247/274 4|274/301 5|301/328 6|328/355 7|355/382

**Para la pieza 14:**

*Operación 22 0/2143*

1|0/78 2|78/137 3|137/196 4|196/255 5|255/314 6|314/373 7|373/432 8|432/491  
9|491/550 10|550/609 11|609/668 12|668/727 13|727/786 14|786/845 15|845/904  
16|904/963 17|963/1022 18|1022/1081 19|1081/1140 20|1140/1199 21|1199/1258  
22|1258/1317 23|1317/1376 24|1376/1435 25|1435/1494 26|1494/1553 27|1553/1612  
28|1612/1671 29|1671/1730 30|1730/1789 31|1789/1848 32|1848/1907 33|1907/1966  
34|1966/2025 35|2025/2084 36|2084/2143

**Para la pieza 15:**

*Operación 23 130/264,8*

1|130/155,6 2|155,6/171,2 3|171,2/186,8 4|186,8/202,4 5|202,4/218 6|218/233,6  
7|233,6/249,2 8|249,2/264,8

**Para la pieza 16:**

*Operación 24 647,8/1112,4*

1|647,8/691,1    2|691,1/729,4    3|729,4/767,7    4|767,7/806    5|806/844,3    6|844,3/882,6  
 7|882,6/920,9    8|920,9/959,2    9|959,2/997,5    10|997,5/1035,8    11|1035,8/1074,1    12|1074,1/1112,4

**Para la pieza 17:**

*Operación 25 0/294*

1|0/74    2|74/129    3|129/184    4|184/239    5|239/294

**Para la pieza 18:**

*Operación 26 0/130*

1|0/16,6    2|16,6/29,2    3|29,2/41,8    4|41,8/54,4    5|54,4/67    6|67/79,6    7|79,6/92,2    8|92,2/104,8  
 9|104,8/117,4    10|117,4/130

Han sido marcados todos los trabajos que van en la última posición de las secuencias y aparte con un asterisco el que corresponde al  $C_{max}$ , que le corresponde a la operación 3 en la máquina 3.

Para los casos de lote de transferencia no ha sido posible presentar un diagrama de Gantt ya que el software LEKIN en su versión académica y gratuita solo permite un máximo de 100 trabajos a representar y este modelo y el siguiente superan en gran cantidad esa cifra.

Ahora se pasará a evaluar la validez de la solución respecto a los límites de carga máximos estipulados en la frontera temporal:

| Estación    | Escenario 1 | Límite de carga | Desviación |
|-------------|-------------|-----------------|------------|
| Máquina 1   | 2192        | 2200,00         | -8,00      |
| Máquina 2   | 2242,4      | 2290,00         | -47,60     |
| Máquina 3   | 2260        | 2290,00         | -30,00     |
| Máquina 4   | 2143        | 2200,00         | -57,00     |
| Máquina 5   | 2194        | 2200,00         | -6,00      |
| Máquina 6   | 2194        | 2200,00         | -6,00      |
| Máquina 7   | 2177        | 2200,00         | -23,00     |
| Máquina 8   | 1731,4      | 1880,00         | -148,60    |
| Máquina 9   | 1479,5      | 1585,00         | -105,50    |
| Carga media | 2068,14     | 2116,11         |            |
| Carga total | 18613,3     | 19045,00        |            |

*Tabla 6-20 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 3*

Este es el primer escenario que no viola ninguna restricción de carga máxima, sin embargo las desviaciones en la mayoría de los casos son bastante reducidas. Esto lleva a plantear la viabilidad este escenario debido a que los datos de este modelo se alejarían de una realidad debido al transporte y los datos de límite de carga son reales, lo que lleva a una más que probable violación de los límites en la etapa de control de la producción. Se necesitará resolver el Escenario 4 para poder ver mejoras de desviación respecto a este.

### 6.5 ESCENARIO 4, MULTITAREA DE LOTE DE TRANSFERENCIA UNITARIO

En este último escenario de resolución se van a mostrar los resultados del modelo de lote de transferencia para el caso multiruta, tras haber resuelto el resto de escenarios se ha podido observar que no se tiene una opción que encaje con el equilibrado de máquinas propuesto a la perfección. Se ha comprobado que la variante monoruta de lote de transferencia no supera los límites de carga pero se necesita aún más holgura para poder aceptar un modelo tan ideal como el lote de transferencia unitario sin tener en cuenta los transportes.

La resolución de este modelo ha estado llena de inestabilidad, el propio software no ha respetado en ocasiones la naturaleza de ciertas variables  $Y$  de carácter binario. Las variables binarias  $Y$  son las encargadas de determinar la relación de precedencia de dos operaciones, que en el caso de este modelo solo se relacionaban la primera y última de las operaciones, se ha observado que en el informe de solución de LINGO ciertas variables  $Y$  toman valores cercanos a cero del orden de  $e-07$  cuando realmente deberían tomar valores de 0, llevando a las operaciones que dependen de la variable en cuestión se solapan, pudiendo ser procesadas a la vez ambas.

La pregunta es, ¿Cómo valores tan pequeños de  $Y$  pueden causar solapes de operaciones? Todo proviene del alto valor que tiene el número  $M$  que se vale para anular la restricción terminación-inicio cuyo valor es 1000000000. Incluso una mínima fracción de este valor puede distorsionar la cota de las restricciones  $s_{r1} \geq c_{r'46} - M * Y_{rr'}$ , haciendo que el start de ese lote no sea mayor o igual que cero sino una cota superior.

Se deberá llevar a cabo una reducción de la complejidad del cálculo de la función objetivo, debido a que anteriormente se buscaba la reducción de todos los tiempos de finalización ocasionando un margen de error bastante grande ya que era un valor muy alto para estar multiplicado por una cantidad tan pequeña. Para ello y como se presenta a continuación se redujo la minimización de la suma de los últimos tiempos de terminación de cada ruta de una pieza.

$$\text{Min } C_{max} + E * \sum_{r=1}^{49} c_{r46}$$

En segundo lugar y para asegurar que no se violen variables binarias se resolvió variando el número  $M$  a 10000, pero los tiempos de resolución crecieron de manera desmesurada, se paró de resolver a las 8 horas. Tras esta respuesta del modelo se optó por dejar  $M$  con un valor de 1000000000 y los resultados fueron satisfactorios como se va a presentar a continuación, el cambio de la función objetivo bastó para solventar el problema.

|                      |               |
|----------------------|---------------|
| Variables            | 4482(1225)    |
| Restricciones        | 5369          |
| Tiempo de resolución | 2 min 45s     |
| Inviabilidad         | 9,53675x10-08 |
| Iteraciones          | 179450        |
| Objetivo             | 1858.967      |

Tabla 6-21 Datos de interés de Escenario 4.

A continuación se presentan las secuencias  $\pi_k$  de cada máquina las cuales se presentan a nivel operación, tomando el tiempo de inicio de la primera pieza del lote y el tiempo de terminación de la última.

| $\pi_k$ | Secuencia    |              |              |              |              |              |              |               |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| M1      | 3<br>(1.2)   | 22<br>(9.1)  |              |              |              |              |              |               |
| M2      | 7<br>(3.2)   | 23<br>(9.2)  | 39<br>(13.2) | 21<br>(8.2)  | 41<br>(14.2) | 33<br>(12.1) | 44<br>(16.1) | 31<br>(11.2)  |
| M3      | 28<br>(11.1) | 20<br>(8.2)  | 26<br>(10.2) | 8<br>(4.1)   | 4<br>(2.1)   |              |              |               |
| M4      | 12<br>(5.2)  | 15<br>(6.2)  | 40<br>(14.1) |              |              |              |              |               |
| M5      | 46<br>(17.1) | 19<br>(8.1)  | 14<br>(6.1)  |              |              |              |              |               |
| M6      | 43<br>(15.2) | 47<br>(17.2) | 17<br>(7.2)  | 29<br>(11.1) | 32<br>(12.1) | 49<br>(18.2) | 27<br>(10.2) | 2(*)<br>(1.1) |
| M7      | 38<br>(13.2) | 18<br>(8.1)  | 30<br>(11.2) | 6<br>(3.1)   |              |              |              |               |
| M8      | 13<br>(6.1)  |              |              |              |              |              |              |               |
| M9      | 1<br>(1.1)   |              |              |              |              |              |              |               |

Tabla 6-22 Secuencias en máquinas de Ejemplo 4

Se puede apreciar que nuevo el máximo tiempo de finalización se encuentra en la operación 2, máquina 6 marcado con un asterisco.

Se presentan ahora los tiempos de inicio y fin de cada una de las piezas individuales que conforman los lotes de transferencia, al igual que el Escenario 3 no se expondrán los tiempos de inicio de set-up sino que serán incluidos en el tiempo de procesamiento de la primera pieza.

Para la **pieza 1**:

Para la ruta 1:

Operación 1 0/1432

1|0/54.5 2|54.5/102 3|102/149.5 4|149.5/197 5|197/244.5 6|244.5/292 7|292/339.5 8|339.5/387  
 9|387/434.5 10|434.5/482 11|482/529.5 12|529.5/577 13|577/624.5 14|624.5/672 15|672/719.5  
 16|719.5/767 17|767/814.5 18|814.5/862 19|862/909.5 20|909.5/957 21|957/1004.5  
 22|1004.5/1052 23|1052/1099.5 24|1099.5/1147 25|1147/1194.5 26|1194.5/1242 27|1242/1289.5  
 28|1289.5/1337 29|1337/1384.5 30|1384.5/1432

Operación 2 922,7/1858,7(\*)

1|922.7/959.7 2|959.7/990.7 3|990.7/1021.7 4|1021.7/1052.7 5|1052.7/1083.7 6|1083.7/1114.7  
 7|1114.7/1145.7 8|1145.7/1176.7 9|1176.7/1207.7 10|1207.7/1238.7 11|1238.7/1269.7  
 12|1269.7/1300.7 13|1300.7/1331.7 14|1331.7/1362.7 15|1362.7/1393.7 16|1393.7/1424.7  
 17|1424.7/1455.7 18|1455.7/1486.7 19|1486.7/1517.7 20|1517.7/1548.7 21|1548.7/1579.7  
 22|1579.7/1610.7 23|1610.7/1641.7 24|1641.7/1672.7 25|1672.7/1703.7 26|1703.7/1734.7  
 27|1734.7/1765.7 28|1765.7/1796.7 29|1796.7/1827.7 30|1827.7/1858.7

Para la ruta 2:

*Operación 3*

1|0/40

Para la **pieza 2:**

Para la ruta 1:

*Operación 4* 941/1367

1|941/959 2|959/971 3|971/983 4|983/995 5|995/1007 6|1007/1019 7|1019/1031 8|1031/1043  
9|1043/1055 10|1055/1067 11|1067/1079 12|1079/1091 13|1091/1103 14|1103/1115  
15|1115/1127 16|1127/1139 17|1139/1151 18|1151/1163 19|1163/1175 20|1175/1187  
21|1187/1199 22|1199/1211 23|1211/1223 24|1223/1235 25|1235/1247 26|1247/1259  
27|1259/1271 28|1271/1283 29|1283/1295 30|1295/1307 31|1307/1319 32|1319/1331  
33|1331/1343 34|1343/1355 35|1355/1367

Para la **pieza 3:**

Para la ruta 1:

*Operación 6* 805/1691

1|805/831 2|831/851 3|851/871 4|871/891 5|891/911 6|911/931 7|931/951 8|951/971  
9|971/991 10|991/1011 11|1011/1031 12|1031/1051 13|1051/1071 14|1071/1091 15|1091/1111  
16|1111/1131 17|1131/1151 18|1151/1171 19|1171/1191 20|1191/1211 21|1211/1231  
22|1231/1251 23|1251/1271 24|1271/1291 25|1291/1311 26|1311/1331 27|1331/1351  
28|1351/1371 29|1371/1391 30|1391/1411 31|1411/1431 32|1431/1451 33|1451/1471  
34|1471/1491 35|1491/1511 36|1511/1531 37|1531/1551 38|1551/1571 39|1571/1591  
40|1591/1611 41|1611/1631 42|1631/1651 43|1651/1671 44|1671/1691

Para la ruta 2:

*Operación 7* 0/71

1|0/16 2|16/27 3|27/38 4|38/49 5|49/60 6|60/71

Para la **pieza 4:**

Para la ruta 1:

*Operación 8* 536/941

1|536/581 2|581/621 3|621/661 4|661/701 5|701/741 6|741/781 7|781/821 8|821/861  
9|861/901 10|901/941

Para la **pieza 5:**

Para la ruta 2:

*Operación 12* 0/107

1|0/17 2|17/27 3|27/37 4|37/47 5|47/57 6|57/67 7|67/77 8|77/87 9|87/97 10|97/107

Para la **pieza 6:**

Para la ruta 1:

*Operación 13* 0/1467,5

1|0/42.5 2|42.5/80 3|80/117.5 4|117.5/155 5|155/192.5 6|192.5/230 7|230/267.5 8|267.5/305  
9|305/342.5 10|342.5/380 11|380/417.5 12|417.5/455 13|455/492.5 14|492.5/530 15|530/567.5

16|567.5/605 17|605/642.5 18|642.5/680 19|680/717.5 20|717.5/755 21|755/792.5 22|792.5/830  
23|830/867.5 24|867.5/905 25|905/942.5 26|942.5/980 27|980/1017.5 28|1017.5/1055  
29|1055/1092.5 30|1092.5/1130 31|1130/1167.5 32|1167.5/1205 33|1205/1242.5 34|1242.5/1280  
35|1280/1317.5 36|1317.5/1355 37|1355/1392.5 38|1392.5/1430 39|1430/1467.5

*Operación 14* 567/1484,5

1|567/587 2|587/604 3|604/621 4|621/638 5|638/655 6|655/672 7|672/689 8|689/706  
9|706/723 10|723/740 11|740/757 12|757/774 13|774/791 14|791/808 15|808/825 16|825/842  
17|842/859 18|859/876 19|876/893 20|893/910 21|910/927 22|927/944 23|944/961 24|961/978  
25|978/995 26|1000.5/1017.5 27|1017.5/1034.5 28|1055/1072 29|1092.5/1109.5 30|1130/1147  
31|1167.5/1184.5 32|1205/1222 33|1242.5/1259.5 34|1280/1297 35|1338/1355 36|1355/1372  
37|1392.5/1409.5 38|1430/1447 39|1467.5/1484.5

Para la ruta 2:

*Operación 15* 107/334

1|107/134 2|134/154 3|154/174 4|174/194 5|194/214 6|214/234 7|234/254 8|254/274  
9|274/294 10|294/314 11|314/334

Para la **pieza 7**:

Para la ruta 2:

*Operación 17* 165,7/295,7

1|165.7/178.7 2|178.7/191.7 3|191.7/204.7 4|204.7/217.7 5|217.7/230.7 6|230.7/243.7  
7|243.7/256.7 8|256.7/269.7 9|269.7/282.7 10|282.7/295.7

Para la **pieza 8**:

Para la ruta 1:

*Operación 18* 75/380

1|75/100 2|100/120 3|120/140 4|140/160 5|160/180 6|180/200 7|200/220 8|220/240  
9|240/260 10|260/280 11|280/300 12|300/320 13|320/340 14|340/360 15|360/380

*Operación 19* 129/567

1|129/161 2|161/190 3|190/219 4|219/248 5|248/277 6|277/306 7|306/335 8|335/364  
9|364/393 10|393/422 11|422/451 12|451/480 13|480/509 14|509/538 15|538/567

Para la ruta 2:

*Operación 20* 78/155

1|78/85 2|85/88.5 3|88.5/92 4|92/95.5 5|95.5/99 6|99/102.5 7|102.5/106 8|106/109.5  
9|109.5/113 10|113/116.5 11|116.5/120 12|120/123.5 13|123.5/127 14|127/130.5 15|130.5/134  
16|134/137.5 17|137.5/141 18|141/144.5 19|144.5/148 20|148/151.5 21|151.5/155

*Operación 21* 369/499

1|369/379 2|379/385 3|385/391 4|391/397 5|397/403 6|403/409 7|409/415 8|415/421  
9|421/427 10|427/433 11|433/439 12|439/445 13|445/451 14|451/457 15|457/463 16|463/469  
17|469/475 18|475/481 19|481/487 20|487/493 21|493/499

Para la **pieza 9**:

Para la ruta 1:

*Operación 22* 40/1842

1|40/87 2|87/126 3|126/165 4|165/204 5|204/243 6|243/282 7|282/321 8|321/360 9|360/399  
10|399/438 11|438/477 12|477/516 13|516/555 14|555/594 15|594/633 16|633/672 17|672/711  
18|711/750 19|750/789 20|789/828 21|828/867 22|867/906 23|906/945 24|945/984 25|984/1023  
26|1023/1062 27|1062/1101 28|1101/1140 29|1140/1179 30|1179/1218 31|1218/1257  
32|1257/1296 33|1296/1335 34|1335/1374 35|1374/1413 36|1413/1452 37|1452/1491  
38|1491/1530 39|1530/1569 40|1569/1608 41|1608/1647 42|1647/1686 43|1686/1725  
44|1725/1764 45|1764/1803 46|1803/1842

Para la ruta 2:

*Operación 23* 71/245

1|71/92 2|92/109 3|109/126 4|126/143 5|143/160 6|160/177 7|177/194 8|194/211 9|211/228  
10|228/245

Para la **pieza 10**:

Para la ruta 2:

*Operación 26* 155/536

1|155/173.5 2|173.5/186 3|186/198.5 4|198.5/211 5|211/223.5 6|223.5/236 7|236/248.5  
8|248.5/261 9|261/273.5 10|273.5/286 11|286/298.5 12|298.5/311 13|311/323.5 14|323.5/336  
15|336/348.5 16|348.5/361 17|361/373.5 18|373.5/386 19|386/398.5 20|398.5/411 21|411/423.5  
22|423.5/436 23|436/448.5 24|448.5/461 25|461/473.5 26|473.5/486 27|486/498.5 28|498.5/511  
29|511/523.5 30|523.5/536

*Operación 27* 742,7 / 922,7

1|742.7/748.7 2|748.7/754.7 3|754.7/760.7 4|760.7/766.7 5|766.7/772.7 6|772.7/778.7  
7|778.7/784.7 8|784.7/790.7 9|790.7/796.7 10|796.7/802.7 11|802.7/808.7 12|808.7/814.7  
13|814.7/820.7 14|820.7/826.7 15|826.7/832.7 16|832.7/838.7 17|838.7/844.7 18|844.7/850.7  
19|850.7/856.7 20|856.7/862.7 21|862.7/868.7 22|868.7/874.7 23|874.7/880.7 24|880.7/886.7  
25|886.7/892.7 26|892.7/898.7 27|898.7/904.7 28|904.7/910.7 29|910.7/916.7 30|916.7/922.7

Para la **pieza 11**:

Para la ruta 1:

*Operación 28* 0/ 78

1|0/32 2|32/55 3|55/78

*Operación 29* 295,7/ 390,7

1|295.7/330.7 2|330.7/360.7 3|360.7/390.7

Para la ruta 2:

*Operación 30* 380/ 788

1|380/397 2|397/414 3|414/431 4|431/448 5|448/465 6|465/482 7|482/499 8|499/516  
9|516/533 10|533/550 11|550/567 12|567/584 13|584/601 14|601/618 15|618/635 16|635/652  
17|652/669 18|669/686 19|686/703 20|703/720 21|720/737 22|737/754 23|754/771 24|771/788  
25|788/805

*Operación 31* 1610/ 1790

1|1610/1622 2|1622/1629 3|1629/1636 4|1636/1643 5|1643/1650 6|1650/1657 7|1657/1664  
8|1664/1671 9|1671/1678 10|1678/1685 11|1685/1692 12|1692/1699 13|1699/1706 14|1706/1713  
15|1713/1720 16|1720/1727 17|1727/1734 18|1734/1741 19|1741/1748 20|1748/1755  
21|1755/1762 22|1762/1769 23|1769/1776 24|1776/1783 25|1783/1790

**Para la pieza 12:**

Para la ruta 1:

*Operación 32* 390,7/ 583,7

1|390.7/414.7 2|414.7/427.7 3|427.7/440.7 4|440.7/453.7 5|453.7/466.7 6|466.7/479.7  
7|479.7/492.7 8|492.7/505.7 9|505.7/518.7 10|518.7/531.7 11|531.7/544.7 12|544.7/557.7  
13|557.7/570.7 14|570.7/583.7

*Operación 33* 763/ 1146

1|763/795 2|795/822 3|822/849 4|849/876 5|876/903 6|903/930 7|930/957 8|957/984  
9|984/1011 10|1011/1038 11|1038/1065 12|1065/1092 13|1092/1119 14|1119/1146

**Para la pieza 13:**

Para la ruta 2:

*Operación 38* 0/ 75

1|0/15 2|15/25 3|25/35 4|35/45 5|45/55 6|55/65 7|65/75

*Operación 39* 71/ 195

1|245/267 2|267/284 3|284/301 4|301/318 5|318/335 6|335/352 7|352/369

**Para la pieza 14:**

Para la ruta 1:

*Operación 40* 334/ 1710

1|334/412 2|412/471 3|471/530 4|530/589 5|589/648 6|648/707 7|707/766 8|766/825  
9|825/884 10|884/943 11|943/1002 12|1002/1061 13|1061/1120 14|1120/1179 15|1179/1238  
16|1238/1297 17|1297/1356 18|1356/1415 19|1415/1474 20|1474/1533 21|1533/1592  
22|1592/1651 23|1651/1710

Para la ruta 2:

*Operación 41* 499/ 763

1|499/523 2|523/543 3|543/563 4|563/583 5|583/603 6|603/623 7|623/643 8|643/663  
9|663/683 10|683/703 11|703/723 12|723/743 13|743/763

**Para la pieza 15:**

Para la ruta 2:

*Operación 43* 0/ 131,2

1|0/16.4 2|16.4/32.8 3|32.8/49.2 4|49.2/65.6 5|65.6/82 6|82/98.4 7|98.4/114.8 8|114.8/131.2

**Para la pieza 16:**

Para la ruta 1:

*Operación 44* 1146/ 1610

1|1146/1189.25    2|1189.25/1227.5    3|1227.5/1265.75    4|1265.75/1304    5|1304/1342.25  
 6|1342.25/1380.5    7|1380.5/1418.75    8|1418.75/1457    9|1457/1495.25    10|1495.25/1533.5  
 11|1533.5/1571.75    12|1571.75/1610

Para la pieza 17:

Para la ruta 1:

*Operación 46* 0/ 129

1|0/74    2|74/129

Para la ruta 2:

*Operación 47* 131,2/ 165,7

1|131.2/142.7    2|142.7/154.2    3|154.2/165.7

Para la **pieza 18**:

Para la ruta 2:

*Operación 49* 583,7/ 742,7

1|583.7/599.6    2|599.6/615.5    3|615.5/631.4    4|631.4/647.3    5|647.3/663.2    6|663.2/679.1    7|679.1/695  
 8|695/710.9    9|710.9/726.8    10|726.8/742.7

Han sido marcados todos los trabajos que van en la última posición de las secuencias y aparte con un asterisco el que corresponde al  $C_{max}$ , que le corresponde a la operación 2 en la máquina 6.

A continuación se presenta la tabla de tolerancia de los resultados del modelo multiruta para lote de transferencia unitario respecto a los límites de cargas propuestos.

| Estación    | Escenario 4 | Límite de carga | Desviación |
|-------------|-------------|-----------------|------------|
| Máquina 1   | 1842        | 2200,00         | -358,00    |
| Máquina 2   | 1790        | 2290,00         | -500,00    |
| Máquina 3   | 1367        | 2290,00         | -923,00    |
| Máquina 4   | 1710        | 2200,00         | -490,00    |
| Máquina 5   | 1484,5      | 2200,00         | -715,50    |
| Máquina 6   | 1858,7      | 2200,00         | -341,30    |
| Máquina 7   | 1691        | 2200,00         | -509,00    |
| Máquina 8   | 1467,5      | 1880,00         | -412,50    |
| Máquina 9   | 1432        | 1585,00         | -153,00    |
| Carga media | 1626,97     | 2116,11         |            |
| Carga total | 14642,7     | 19045,00        |            |

*Tabla 6-23 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 4*

A simple vista se puede apreciar el poder de reducción que puede tener el modelo, las tolerancias son totalmente admisibles en cada una de las máquinas. Como se comentó anteriormente, la posibilidad de abstracción aún más de los tiempos añadiéndole los transportes unitarios es posible. La máquina con el margen más crítico, la máquina 9 con unas dos horas y media, no es crucial para el transporte ya que solo lo compone un lote de piezas las cuales se comportan como lote completo. Es por ello que este modelo es el único de los cuatro presentados que tiene cabida real en el problema y de ahí su criticidad a poder tenerlo de manera óptima.

### **6.5.1 ANÁLISIS DEL MODELO: REDUCCIÓN A LOTE COMPLETO, MANTENIENDO FUNCIÓN OBJETIVO**

Ya que estamos ante la única solución que ha resultado factible de todos los escenarios, es importante hacer un proceso iterativo para mejorarlo en cuestiones de eficiencia y complejidad. Tras observar el modelo y la tabla de datos de la sección de Modelado del Problema se puede apreciar que tan solo 8 rutas de las 26 que son utilizadas tienen más de un elemento en su secuencia de operación. La condición básica de la aplicación del lote de transferencia es que hayan más de dos elementos en la secuencia y es por ello que salvo estas 8 rutas el resto siempre se han comportado como un lote único, y por ello disgregarlas en piezas unitarias es innecesario.

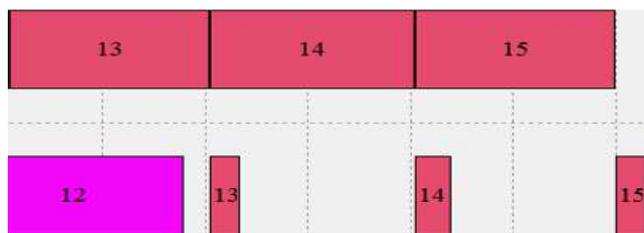
Realizar esta reducción supondría poder reducir una gran cantidad de variables de decisión *Start* que son las realmente determinantes ya que las de *Completion* están determinadas por las anteriores. Pero el principal problema resulta de la naturaleza de los modelos planteados de lote de transferencia, al depender de una matriz única donde sus elementos horizontales lo determinan la máxima demanda de todas las piezas, la reducción tendría un impacto menor al esperado. Es por ello que las operaciones que ahora son de lote completo solo tendrán tiempos de procesamiento mayores que cero en su primer elemento de su fila y el resto seguirá siendo cero. Esta variación del modelo resultaría atractiva si alguna de las operaciones reducidas tuviera altas demandas de cara a poder reducir el tamaño de la matriz, y la respuesta es sí. Los trabajos 6 y 22 tenían demandas de 44 y 46 respectivamente y ahora se reducen a un solo lote, por lo que la dimensión horizontal de la matriz se queda en 39. Un total de 245 variables *Start* han sido eliminadas.

Tras resolverlo, se ha comprobado que el valor de la función objetivo ha mantenido el mismo valor y por tanto los tiempos de finalización de cada máquina se han mantenido iguales.

### **6.5.2 ANÁLISIS DEL MODELO: REDUCCIÓN A LOTE COMPLETO CON LOTE DE TRANSFERENCIA MIXTO**

Esta vez se le aportará una variación al modelo que supondrá una mejora sustancial a los tiempos de terminación de la mayoría de máquinas que tengan entre su secuencia de operación trabajos que estén sometidos a lote de transferencia.

Como se pudo introducir en la sección de Notación y Conceptos en el apartado de lote de transferencia, la transferencia de piezas entre máquinas puede ocasionar diversos comportamientos en función de los tiempos de procesamiento de las máquinas que intervienen. En concreto el caso en el que los tiempos de la primera máquina (punto de partida de la pieza o lote de transferencia) son mayores que en la segunda máquina (destino de llegada de la pieza o lote de transferencia), donde se originan tiempos de espera entre llegadas de piezas a procesar.



*Ilustración 16 Fenómeno de lote de transferencia*

Para evitar esto, se propuso la solución de movilizar la finalización del lote completo en la segunda máquina al instante donde terminará la primera, para así asegurar que todos los trabajos se realizarán en bloque. Este sería el objetivo a aplicar en este modelo, ya se tienen identificadas las rutas que se comportan como lote completo del modelo anterior y ahora solo quedaría seleccionar cuales de las que pasan por dos máquinas tienen un tiempo de procesamiento inferior en la segunda máquina de la secuencia de la pieza. Cabe destacar que este fenómeno solo se ocasiona si al llegar el momento de ser transferido el primer bloque la segunda máquina está libre, si no fuera así se comportaría como un lote completo.

Una nueva idea se ha de introducir, el lote de transferencia mixto. Que un trabajo dispuesto por un conjunto de piezas a procesar en una secuencia de máquinas definida se rija bajo un lote de transferencia mixto significa que no habrá un patrón de transferencia de una máquina a otra, o en otras palabras el número de piezas que se trasladarán cada vez a la siguiente máquina no tiene por qué ser el mismo.

La idea es la siguiente; cada ruta de un tipo de pieza que tenga un tiempo menor en su segunda máquina tendrá un primer lote de transferencia que será lo suficientemente grande como para aportar un colchón de tiempo para que el resto de transferencias unitarias puedan procesarse sin haber tiempos de espera entre ellas. La determinación de este tamaño de lote de transferencia se realizará antes de ejecutar del modelo y por ello será un dato.

Para poder calcularlo se ejecutará un simple modelo en LINGO y una serie de cálculos en hoja Excel. En primer lugar el modelo se encarga de escribir en un fichero de texto los instantes de inicio y fin de cada uno de las operaciones que constan cada ruta de cada tipo de pieza que han sido seleccionados para el estudio. En segundo lugar se calculan los tiempos totales de procesamiento de cada elemento de la secuencia y se plantea la siguiente tabla en Excel:

| Operaciones | Demanda | T.P.+Set-up | T.P.Unitario | T.P total | Diferencia | Fin Superior | Tam. L.P |
|-------------|---------|-------------|--------------|-----------|------------|--------------|----------|
| 1.1.1       | 30      | 54,5        | 47,5         | 1432      | 496        | 529,5        | 11       |
| 1.1.2       |         | 37          | 31           | 936       |            |              |          |
| 6.1.1       | 39      | 42,5        | 37,5         | 1467,5    | 801,5      | 830          | 22       |
| 6.1.2       |         | 20          | 17           | 666       |            |              |          |
| 10.2.1      | 30      | 18,5        | 12,5         | 381       | 201        | 206          | 16       |
| 10.2.2      |         | 6           | 6            | 180       |            |              |          |
| 11.2.1      | 25      | 17          | 17           | 425       | 245        | 255          | 15       |
| 11.2.2      |         | 12          | 7            | 180       |            |              |          |

*Tabla 6-24 Tabla de cálculos para análisis de sensibilidad 2*

- **T.P+Set-up** Es la suma del tiempo de procesado unitario y el tiempo de set-up que tendría la primera pieza de un lote.
- **T.P unitario.** El tiempo unitario de proceso de una pieza en una máquina determinada.
- **T.P total.** Resulta de sumar el tiempo de procesado con el tiempo de set-up y el producto de la demanda menos uno por el tiempo de procesado unitario, representando el tiempo que lleva procesar todas las piezas que constan en la ruta en una máquina.
- **Diferencia.** Resta de los tiempos de procesado total de ambas máquinas de una ruta.

Tras tener esto se deberá buscar en la salida de texto del modelo LINGO, para cada ruta sujeta a estudio el trabajo más cercano al tiempo del campo *Diferencia* sin ser inferior a él. Así por ejemplo en la ruta 1.1 tras resultar 496 de la diferencia de tiempos entre ambas máquinas, la pieza nº11 del lote es la que termina en el instante más cercano superior al valor 496 con valor de 529,5 min. Es por tanto que para asegurar el colchón de tiempo se deberá esperar a procesar 11 piezas para transferir a su siguiente máquina, tras este grupo de piezas la transferencia será unitaria.

- **Fin superior.** Tiempo de terminación de la pieza seleccionada como inicio de la transferencia del primer bloque de transferencia.
- **Tam. L.P.** Tamaño del primer bloque de procesado de la transferencia hacia la segunda máquina.

Esto es crucial para seguir reduciendo el tamaño de la matriz de *Starts* y *Completions*, en concreto en el modelo anterior la máxima demanda era de 39 (con demanda se quiere referir a elementos de procesado, los cuales serán transferidos en bloque), ahora el máximo es de 21 elementos en bloque, en la ruta 2ª del tipo de pieza 8. Si comparáramos con el modelo inicial de transferencia unitaria en multiruta se han reducido 630 variables de *Start*.

Se presentan los resultados y datos vinculantes a la resolución del modelo:

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| Variabes             | 2732(1225)               |
| Restricciones        | 2519                     |
| Tiempo de resolución | 5h 36 min<br>(No óptimo) |
| Inviabilidad         | 2,55795x10-13            |
| Iteraciones          | 193663299                |
| Objetivo             | 1858,960                 |

Tabla 6-25 Datos de interés de Escenario 4, análisis de sensibilidad 2.

El tiempo de resolución se ha disparado hasta el punto de que tras más de 5 horas no ha sido posible encontrar una solución. Se puede observar la gran reducción de variables respecto a su modelo padre, que tenía un total de 4482 frente a las 2732 restricciones actuales. Sin embargo esta solución parcial ayudará a analizar el impacto que tiene incluir los lotes de transferencia mixtos en los modelos de cara a la mejora de la función objetivo.

A continuación se presenta las secuencias que la solución parcial ha aportado:

|    | Secuencia    |              |              |             |              |              |              |               |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| M1 | 3<br>(1.2)   | 22<br>(9.1)  |              |             |              |              |              |               |
| M2 | 7<br>(3.2)   | 39<br>(13.2) | 21<br>(8.2)  | 23<br>(9.2) | 41<br>(14.2) | 31<br>(11.2) | 33<br>(12.1) | 44<br>(16.1)  |
| M3 | 28<br>(11.1) | 20<br>(8.2)  | 26<br>(10.2) | 8<br>(4.1)  | 4<br>(2.1)   |              |              |               |
| M4 | 12<br>(5.2)  | 15<br>(6.2)  | 40<br>(14.1) |             |              |              |              |               |
| M5 | 46<br>(17.1) | 19<br>(8.1)  | 14<br>(6.1)  |             |              |              |              |               |
| M6 | 47<br>(17.2) | 29<br>(11.1) | 43<br>(15.2) | 17<br>(7.2) | 49<br>(18.2) | 32<br>(12.1) | 27<br>(10.2) | 2(*)<br>(1.1) |
| M7 | 38<br>(13.2) | 18<br>(8.1)  | 30<br>(11.2) | 6<br>(3.1)  |              |              |              |               |
| M8 | 13<br>(6.1)  |              |              |             |              |              |              |               |
| M9 | 1<br>(1.1)   |              |              |             |              |              |              |               |

Tabla 6-26 Secuencias en máquinas de Ejemplo 4, análisis de sensibilidad 2

Excepto cambios en las máquinas de más carga de operaciones diferentes las secuencias se mantienen intactas respecto a su problema padre en la solución factible presentada y con ello su máximo tiempo de finalización, marcada con un asterisco se encuentra el trabajo que supone el máximo tiempo de finalización, el cual le corresponde al trabajo 2, máquina 6. La poca variación del valor de la función objetivo indica que para mejorar la función objetivo los trabajos que tenían el tiempo de procesado en su segunda máquina están actuando como lote completo debido a que es incompatible que estén a la vez siendo procesadas y con ello que se coja ventaja con la lotificación mixta. Aun así la función objetivo ha mejorado en 0,07, proveniente de la suma de todos los tiempos de finalización de las últimas piezas de cada ruta usada. Los tiempos de espera entre pedidos quedan reducidos a la máquina 5 entre los trabajos 14 y 19.

A continuación se presentan los resultados en texto del conjunto de tareas que componen el Jobshop, de manera agregada para los lotes completos y desagregados para los lotes de transferencia:

Para la **pieza 1:**

Para la ruta 1:

Operación 1 0/1842

1|0/529.5    2|529.5/577    3|577/624.5    4|624.5/672    5|672/719.5    6|719.5/767    7|767/814.5  
 8|814.5/862    9|862/909.5    10|909.5/957    11|957/1004.5    12|1004.5/1052    13|1052/1099.5  
 14|1099.5/1147    15|1147/1194.5    16|1194.5/1242    17|1242/1289.5    18|1289.5/1337  
 19|1337/1384.5    20|1384/1432

Operación 2 922,7/1858.7(\*)

1|922.7/1269.7    2|1269.7/1300.7    3|1300.7/1331.7    4|1331.7/1362.7    5|1362.7/1393.7

6|1393.7/1424.7    7|1424.7/1455.7    8|1455.7/1486.7    9|1486.7/1517.7    10|1517.7/1548.7  
11|1548.7/1579.7    12|1579.7/1610.7    13|1610.7/1641.7    14|1641.7/1672.7    15|1672.7/1703.7  
16|1703.7/1734.7    17|1734.7/1765.7    18|1765.7/1796.7    19|1796.7/1827.7    20|1827.7/1858.7

Para la ruta 2:

*Operación 3*

1|0/40

Para la **pieza 2:**

Para la ruta 1:

*Operación 4*

1|941/1367

Para la **pieza 3:**

Para la ruta 1:

*Operación 6*

1|805/1691

Para la ruta 2:

*Operación 7*

1|0/71

Para la **pieza 4:**

Para la ruta 1:

*Operación 8*

1|536/941

Para la **pieza 5:**

Para la ruta 2:

*Operación 12*

1|0/107

Para la **pieza 6:**

Para la ruta 1:

*Operación 13* 0/1467.5

1|0/830    2|830/867.5    3|867.5/905    4|905/942.5    5|942.5/980    6|980/1017.5    7|1017.5/1055  
8|1055/1092.5    9|1092.5/1130    10|1130/1167.5    11|1167.5/1205    12|1205/1242.5    13|1242.5/1280  
14|1280/1317.5    15|1317.5/1355    16|1355/1392.5    17|1392.5/1430    18|1430/1467.5

*Operación 14* 830/1496

1|830/1207    2|1207/1224    3|1224/1241    4|1241/1258    5|1258/1275    6|1275/1292    7|1292/1309  
8|1309/1326    9|1326/1343    10|1343/1360    11|1360/1377    12|1377/1394    13|1394/1411  
14|1411/1428    15|1428/1445    16|1445/1462    17|1462/1479    18|1479/1496

Para la ruta 2:

*Operación 15*

1|107/334

Para la **pieza 7:**

Para la ruta 2:

*Operación 17 129,5/259,5*

1|129.5/142.5    2|142.5/155.5    3|155.5/168.5    4|168.5/181.5    5|181.5/194.5    6|194.5/207.5  
7|207.5/220.5    8|220.5/233.5    9|233.5/246.5    10|246.5/259.5

Para la **pieza 8:**

Para la ruta 1:

*Operación 18 75/567*

1|75/100    2|100/120    3|120/140    4|140/160    5|160/180    6|180/200    7|200/220    8|220/240  
9|240/260    10|260/280    11|280/300    12|300/320    13|320/340    14|340/360    15|360/380

*Operación 19 129/567*

1|129/161    2|161/190    3|190/219    4|219/248    5|248/277    6|277/306    7|306/335    8|335/364  
9|364/393    10|393/422    11|422/451    12|451/480    13|480/509    14|509/538    15|538/567

Para la ruta 2:

*Operación 20 78/155*

1|78/85    2|85/88.5    3|88.5/92    4|92/95.5    5|95.5/99    6|99/102.5    7|102.5/106    8|106/109.5  
9|109.5/113    10|113/116.5    11|116.5/120    12|120/123.5    13|123.5/127    14|127/130.5    15|130.5/134  
16|134/137.5    17|137.5/141    18|141/144.5    19|144.5/148    20|148/151.5    21|151.5/155

*Operación 21 195/325*

1|195/205    2|205/211    3|211/217    4|217/223    5|223/229    6|229/235    7|235/241    8|241/247  
9|247/253    10|253/259    11|259/265    12|265/271    13|271/277    14|277/283    15|283/289  
16|289/295    17|295/301    18|301/307    19|307/313    20|313/319    21|319/325

Para la **pieza 9:**

Para la ruta 1:

*Operación 22*

1|40/1842

Para la ruta 2:

*Operación 23*

1|325/499

Para la **pieza 10:**

Para la ruta 2:

*Operación 26 155/536*

1|155/361    2|361/373.5    3|373.5/386    4|386/398.5    5|398.5/411    6|411/423.5    7|423.5/436  
8|436/448.5    9|448.5/461    10|461/473.5    11|473.5/486    12|486/498.5    13|498.5/511    14|511/523.5  
15|523.5/536

*Operación 27 583,7/763,7*

1|583.7/679.7    2|679.7/685.7    3|685.7/691.7    4|691.7/697.7    5|697.7/703.7    6|703.7/709.7  
7|709.7/715.7    8|715.7/721.7    9|721.7/727.7    10|727.7/733.7    11|733.7/739.7    12|739.7/745.7  
13|745.7/751.7    14|751.7/757.7    15|757.7/763.7

**Para la pieza 11:**

Para la ruta 1:

*Operación 28 0/78*

1|0/32    2|32/55    3|55/78

*Operación 29 34,5/129,5*

1|34.5/69.5    2|69.5/99.5    3|99.5/129.5

Para la ruta 2:

*Operación 30 380/805*

1|380/635    2|635/652    3|652/669    4|669/686    5|686/703    6|703/720    7|720/737    8|737/754  
9|754/771    10|771/788    11|788/805

*Operación 31 763/943*

1|763/873    2|873/880    3|880/887    4|887/894    5|894/901    6|901/908    7|908/915    8|915/922  
9|922/929    10|929/936    11|936/943

**Para la pieza 12:**

Para la ruta 1:

*Operación 32*

1|390,7/583,7

*Operación 33*

1|943/1326

**Para la pieza 13:**

Para la ruta 2:

*Operación 38 0/75*

1|0/15    2|15/25    3|25/35    4|35/45    5|45/55    6|55/65    7|65/75

*Operación 39 71/195*

1|71/93    2|93/110    3|110/127    4|127/144    5|144/161    6|161/178    7|178/195

**Para la pieza 14:**

Para la ruta 1:

*Operación 40*

1|334/1710

Para la ruta 2:

*Operación 41*

1|499/763

**Para la pieza 15:**

Para la ruta 2:

*Operación 43*

1|259.5/390.7

Para la **pieza 16**:

Para la ruta 1:

*Operación 44*

1|1326/1790

Para la pieza 17:

Para la ruta 1:

*Operación 46*

1|0/129

Para la ruta 2:

*Operación 47*

1|0/34.5

Para la pieza 18:

Para la ruta 2:

*Operación 49*

1|763.7/922.7

Los tiempos de finalización de las operaciones que están marcados indican los máximos tiempos de finalización de la máquina en que son procesadas mientras que la operación marcada con un asterisco está marcado el máximo tiempo de finalización. A continuación se presenta la tabla de tolerancia de cargas para este modelo:

| Estación    | Escenario 1    | Límite de carga | Desviación |
|-------------|----------------|-----------------|------------|
| Máquina 1   | 1842           | 2200,00         | -358,00    |
| Máquina 2   | 1790           | 2290,00         | -500,00    |
| Máquina 3   | 1367           | 2290,00         | -923,00    |
| Máquina 4   | 1710           | 2200,00         | -490,00    |
| Máquina 5   | <b>1496(*)</b> | 2200,00         | -704,00    |
| Máquina 6   | 1858,7         | 2200,00         | -341,30    |
| Máquina 7   | 1691           | 2200,00         | -509,00    |
| Máquina 8   | 1467,5         | 1880,00         | -412,50    |
| Máquina 9   | 1432           | 1585,00         | -153,00    |
| Carga media | 1628,24        | 2116,11         |            |
| Carga total | 14654,2        | 19045,00        |            |

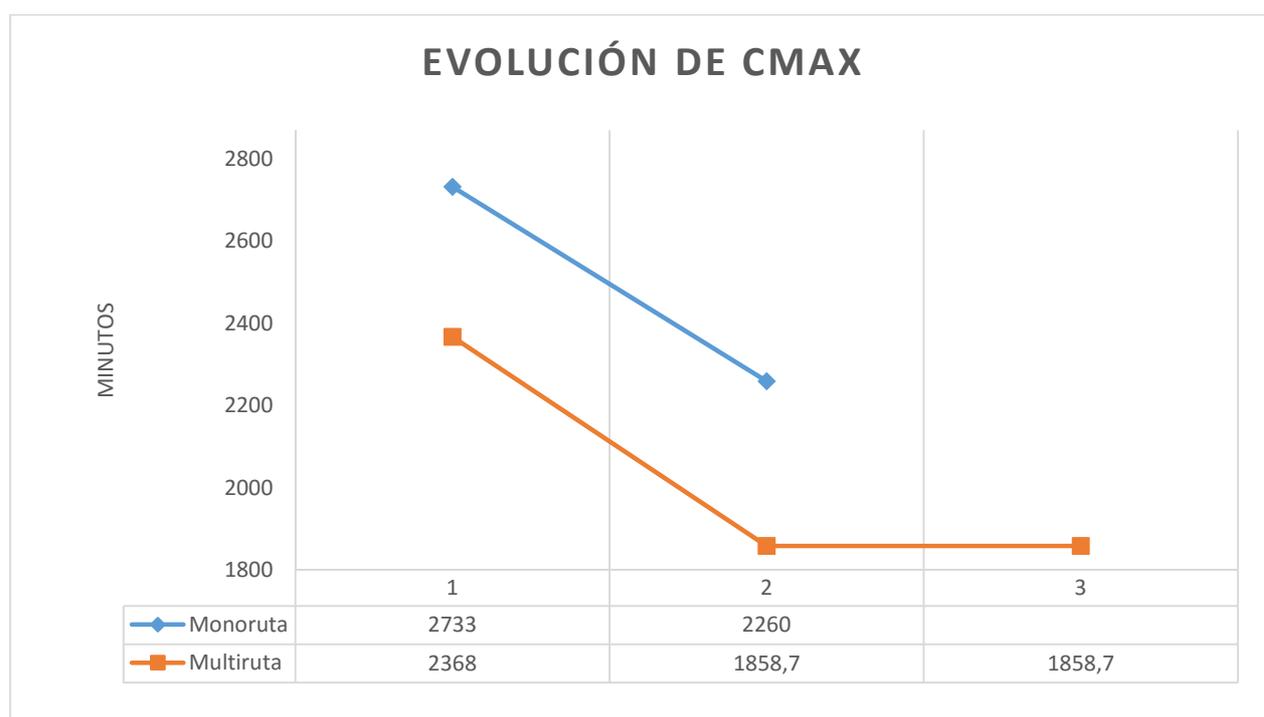
*Tabla 6-27 Tabla de desviaciones de carga de Escenario 4, análisis de sensibilidad 2*

Marcado con un asterisco está marcado el único máximo tiempo de finalización que es diferente a su modelo antecesor, 1496, que es superior al anterior debido seguramente al mero hecho de que no es una solución óptima y aún le quedaba por mejorar a la función objetivo.

## 6.6 ESCENARIO COMPARATIVO

Este apartado tiene como objetivo crear un marco comparativo mediante gráficos que ayuden a visualizar correctamente los datos más destacados que pueden ser obtenidos de manera común en todos los modelos. Los modelos que van a estar en los gráficos son los escenarios 1-4 y el modelo 2 de análisis del modelo del escenario 4.

De primera mano se va a plasmar la evolución del valor más crítico del resultado de los modelos, el cual se puede vislumbrar la viabilidad de un modelo tan solo conociendo su valor, el máximo tiempo de finalización.



*Grafico 1 Evolución del Cmax*

En el eje de coordenadas se representan en primer lugar con el número **1** el caso sin lote de transferencia donde se realizaron las variantes monoruta y multiruta, el número **2** que corresponde a los modelos de lote de transferencia unitario y por último el número **3** donde se realizó el análisis de sensibilidad con lote de transferencia mixto para el caso multiruta.

Se puede apreciar que las reducciones de Cmax entre visiones multiruta y monoruta son ciertamente similares, en la siguiente tabla se muestran las mejoras temporales del valor Cmax desde la perspectiva de disposición de rutas y de cambio de lotificación.

|              | S.L.T | C.L.T.U | Reduc. Trans |
|--------------|-------|---------|--------------|
| Monoruta     | 2733  | 2368    | 15%          |
| Multiruta    | 2260  | 1858,7  | 22%          |
| Reduc. Rutas | 21%   | 27%     |              |

Tabla 6-28 Mejora de Cmax

Otro aspecto crucial en la búsqueda de la viabilidad entre modelos es la utilización de las máquinas. El objetivo de estos modelos no tiene por qué ser conseguir los tiempos de finalización de las últimas operaciones de cada máquina más bajos, una distribución u otra supone una alteración del trabajo en taller que hay que considerar su impacto y aunque los tiempos sean los más reducidos puede ser utópico físicamente y económicamente. En esta gráfica se presentan los valores de carga de cada máquina para los escenarios resueltos:

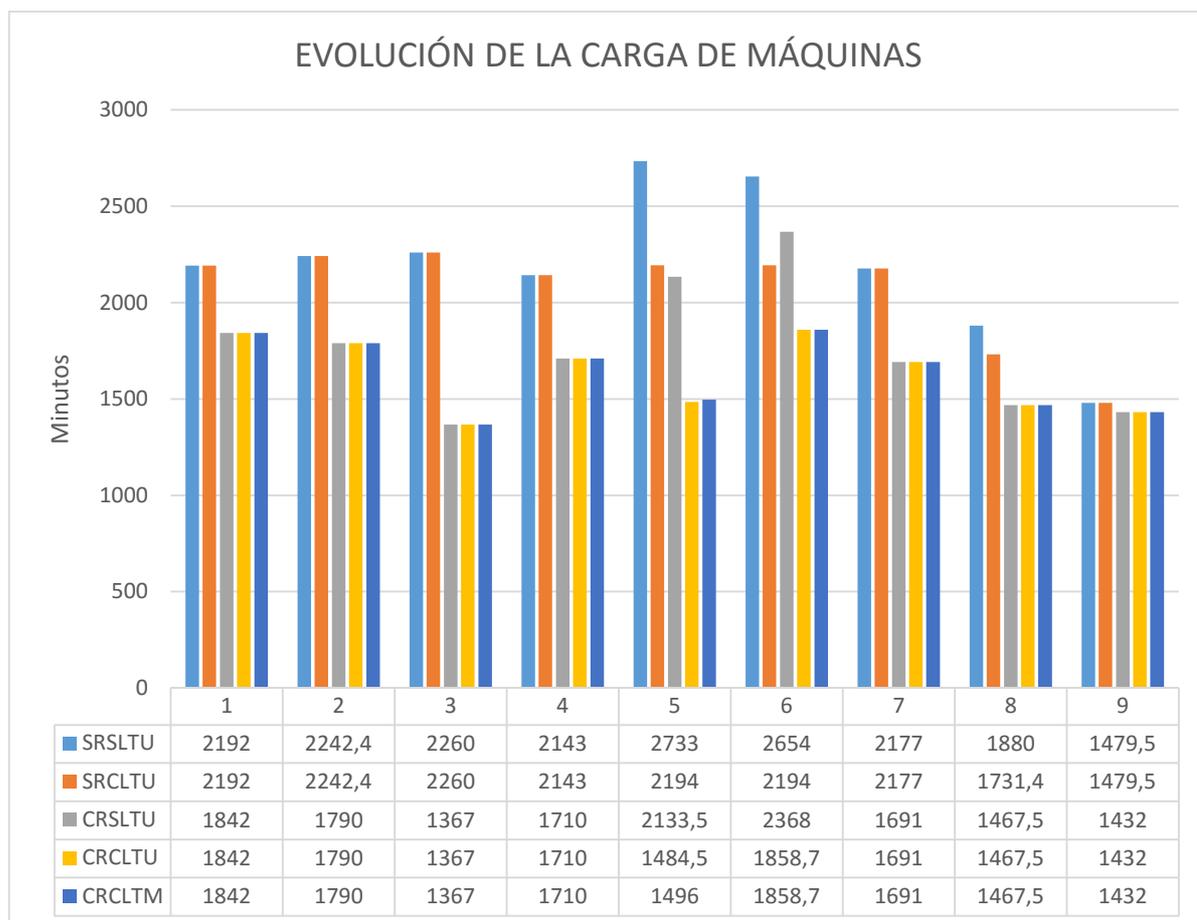


Grafico 2 Evolución de carga de máquinas

Donde **SR** y **CR** se refiere a monoruta y multiruta respectivamente, **CLTU** y **SLTU** a con lote de transferencia unitario y sin él respectivamente y por último **CLTM** que se reserva para el caso de con lote de transferencia mixto.

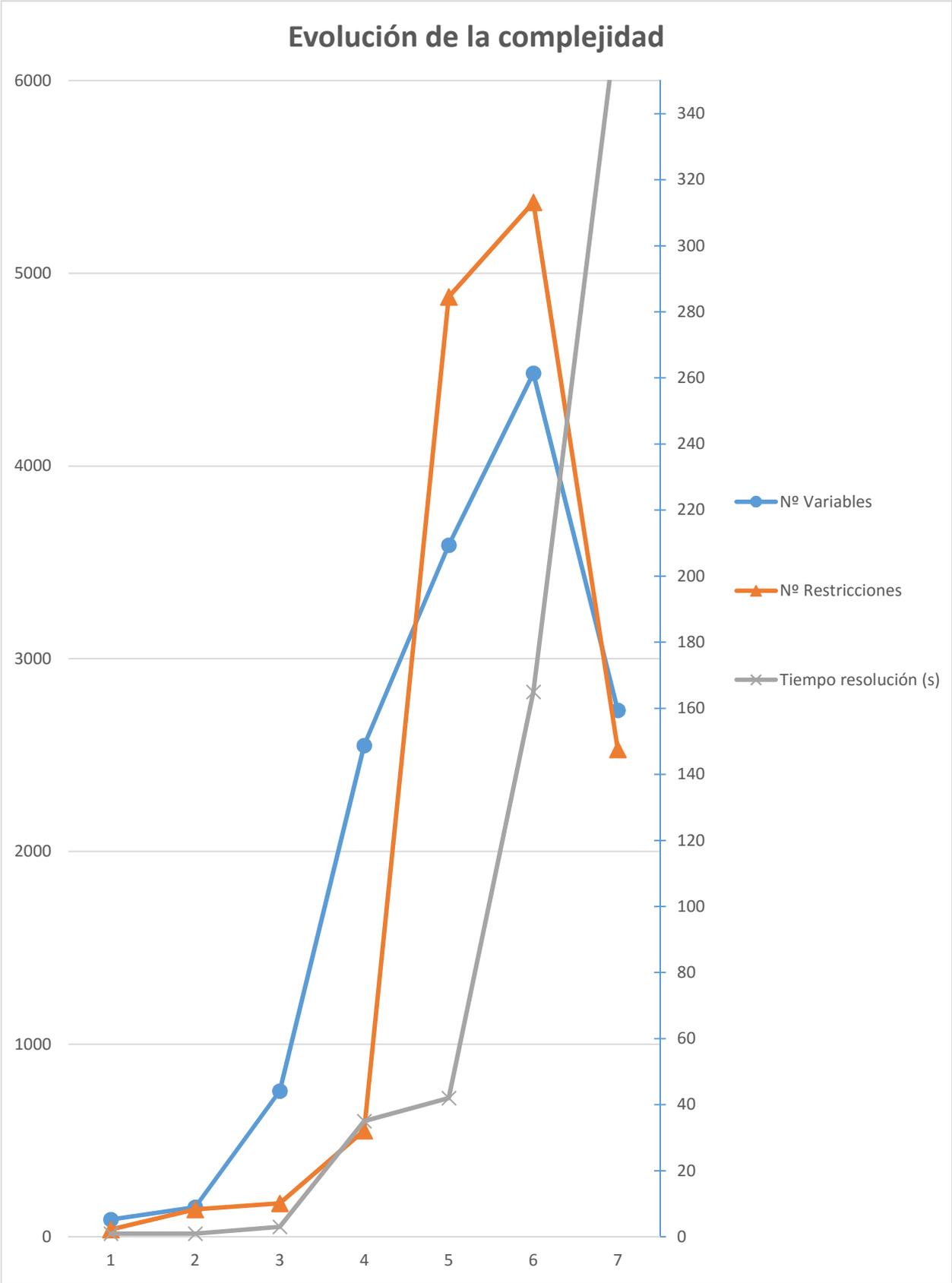
Este gráfico nos muestra información valiosa, se puede analizar que máquinas tienen más criticidad en cuanto a cambios de carga en los modelos aplicados, como pueden ser las máquinas 5 y 6. Otras máquinas como la 1 donde hay dos operaciones asignadas se aprecia una mejora entre casos monoruta y multiruta al tener una relajación de demanda pero ninguna diferencia entre modelos de transferencia diferentes. Las máquinas más críticas son por donde pasan más segundas operaciones de piezas y más pueden ser afectadas por la lotificación de transferencia.

En la siguiente tabla se puede observar la cuantificación de la complejidad a lo largo de la resolución de los

modelos. De manera que los números **1** y **2** representan a los Ejemplos de aplicación 1 y 2 respectivamente, del **3** al **6** se representan los Escenarios 1-4 y por último el número **7** es el análisis de sensibilidad realizado al escenario 4 con lotes de transferencia mixtos.

La escala de valores de la izquierda representa la cantidad de restricciones y variables y la de la derecha los segundos de resolución. Se puede observar que el escenario número 7 tiende a infinito en el tiempo de resolución ya que la resolución del modelo se paró tras 6 horas sin obtener un resultado óptimo.

Un aspecto importante es la proporción de variables frente a restricciones, en los casos sin lote de transferencia, 3 y 4 el número de variables es siempre bastante superior que al de restricciones pero sin embargo la situación cuando es aplicado el lote de transferencia es bien distinta, el número de restricciones se dispara de manera superior a las variables, las cuales también crecen debido a la disgregación unitaria de los lotes. De una manera u otra la tendencia del tiempo de resolución es creciente conforme aumentan sus restricciones y variables pero como se ha podido analizar en el anterior escenario, para el caso de lote de transferencia mixto todo se altera. A pesar de reducir el número de variables a niveles de uno de los casos de tipo monoruta se dispara el tiempo de resolución. Puede ser la causa el hecho de haber reducido por debajo de las variables las restricciones una de las razones del aumento de complejidad del modelo.



*Gráfico 3 Evolución de la complejidad*

Como último análisis se va a comparar la opción mejor de todos los modelos, el escenario 4 con los resultados que mostraron el modelo de equilibrado de carga del trabajo basado en su caso multiruta:

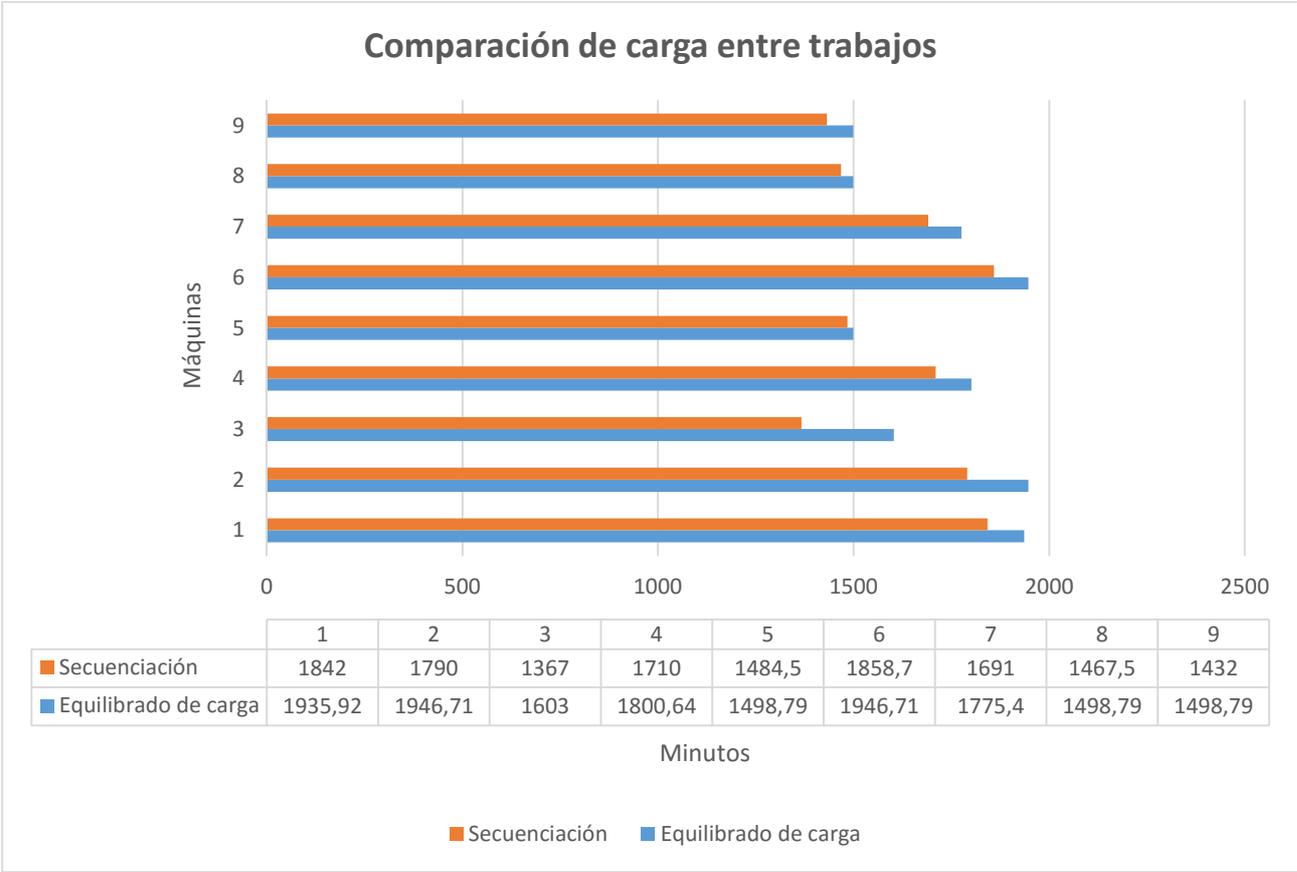


Grafico 4 Comparación de carga entre trabajos

Los datos han sido recogidos de las cargas del escenario 4 de este trabajo y del escenario 2 del trabajo de carga de máquinas de [Romo de Vivar, 2015] descrito en la sección de descripción del problema.

Se puede apreciar que la secuenciación ha arrojado mejores resultados de carga en todas las máquinas, pero la tendencia de todas se sigue, exceptuando a la máquina 3 que tiene una mayor tolerancia respecto a su homologo.

# 7 CONCLUSIONES

---

## 7.1 CONCLUSIONES

Este trabajo ha tratado de dar solución a un problema de secuenciación de tareas en un entorno real, para ello se han aportado diversas visiones para dar solución al problema en forma de modelos matemáticos de programación lineal. La principal razón por la que se presentan diversos modelos o visiones es debido a la operatividad que tiene el campo de la secuenciación, la construcción de un modelo determinista necesita de abstracción y con ello la separación de la realidad. De nada sirve aportar una solución utópica al problema si no va a poder aplicarse a la realidad, es por ello que el hecho de poder aportar diferentes soluciones y con ello nuevas formas de flujo de tareas en el taller determina poder asegurar un éxito del estudio.

Hoy en día la optimización matemática es una solución plena para empresas de calibre mediano como la que se introduce en este trabajo, una vez que el volumen de producción es suficientemente alto los métodos de prueba y error desembocan en pérdidas. Este trabajo busca ser la última pieza de una cadena de optimización antes de comenzar la producción y las herramientas de control. Es trabajo del analista nutrirse de los trabajos de investigación que existen, modelos generalizados y adaptables a un gran número de escenarios, para poder hacer un trabajo de síntesis y elaborar modelos más livianos y operativos que encajen a la perfección con el escenario de estudio.

Se ha apreciado un aumento de la estabilidad de los modelos en cuanto el concepto de lote de transferencia se ha ido aplicando, es por ello que es posible que seguir trabajando con la programación lineal mixta entera puede que no sea la mejor vía de proseguir con la optimización de este problema. A pesar de ello se han aportado modelos relativamente versátiles.

Respecto a la adaptación al principal aportador de datos de entrada, el equilibrado de carga, se ha podido ver que en los últimos modelos planteados se ciñen perfectamente tanto a los límites de carga calculados como por las cargas del modelo multiruta.

Un concepto poco plasmado en la literatura, el lote de transferencia, ha sido aplicado con éxito en el problema, dando resultados muy satisfactorios. Si bien el lote de transferencia supone un cambio drástico en el trabajo clásico en taller, ya que el flujo de transporte ha de ser continuo y para ello se necesita infraestructura adicional. Siempre y cuando la empresa pueda responder a este coste añadido de transporte y tenga acceso a un mayor volumen de pedidos que antes no podía cubrir, es la opción perfecta para reducir los tiempos de proceso en las máquinas y aumentar la competitividad.

Este trabajo es un primer contacto para comenzar a aplicar un sistema de secuenciación en la empresa, donde se han planteado la diversificación de rutas y de lotes para poder ver su poder de aplicación.

## 7.2 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Como búsqueda constante de mejora, este Trabajo de Fin de Grado debe servir como primer paso para introducir la secuenciación al entorno real semanal de la empresa. Los modelos presentados deben seguir mejorando. Se ha de tener en cuenta que todos los modelos propuestos en este trabajo han partido a su vez de uno previo y han sido modificados para adaptarse a cada caso, pero es a partir de ahora que en base a los resultados se ha de escoger la que realmente le interesa a la empresa y comenzar a refinar el o los modelos para conseguir su integración y maniobrabilidad total.

Un siguiente paso de cara a conseguir soluciones óptimas más eficientes, ya que es un problema NP, sería trabajar con heurísticas o metaheurísticas que permitan reducir el espacio de soluciones del problema, por ejemplo un algoritmo genético.

Es crucial que el tomador de decisiones no tenga que lidiar directamente con los modelos como se ha hecho en este trabajo ya que interactuar con el modelo cada vez que los datos varíen puede ocasionar que resulte complicado y poco fiable para el trabajador, una aplicación que automatizara la entrada y salida de datos sería la meta. La aplicación informática debe de ser capaz de leer datos de manera masiva, generar informes que puedan ser entendidos tanto por el tomador de decisiones como por los operarios en taller con elementos gráficos como diagramas de Gantt. En definitiva tener un entorno de analista y un entorno orientado a usuario que permita eliminar riesgos de perturbación de la solución.

La naturaleza es estocásticas como ya se ha comentado y es crucial que una vez obtenida la distribución de tareas a pie de máquina existan mecanismos de actuación que regulen y controlen los eventos que puedan incurrir en desviaciones de la solución óptima durante el transcurso de la actividad productiva. El campo del control de la producción está compuesto por el estudio y aplicación constante de herramientas que ayuden a seguir la senda de lo programado y reducir el impacto de desviaciones en la misma. Estas herramientas pueden ser de corte matemático o no y su principal objetivo es reprogramar la producción para asegurar buenos valores de la función objetivo que fue marcada en la secuenciación, en estos casos los tiempos de resolución que han de tener estas herramientas deben de ser muy reducidos para no afectar gravemente al flujo productivo. Es por ello que todo buen sistema de secuenciación ha de tener un sistema de control eficiente que le sirva de retroalimentación para ajustes en el modelo.

Una futura línea de investigación podría ser idear un conjunto de herramientas que pudieran dar respuestas a los imprevistos y que se sirviera de un modelo de simulación discreta donde se puedan aplicar de manera segura las técnicas para asegurar su viabilidad.

# 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- [Adams, Balas and Zawack, 1988] Adams, J., Balas, E., and Zawack, D., (1988), “The shifting bottleneck procedure for job-shop scheduling”, *Management Science* 34/3, March, 391-401.
- [Akers and Friedman, 1955] Akers, S. B. Jr., and Friedman, J., (1955), “A Non Numerical Approach to Scheduling Problems”, *Operations Research* 3, 429-442.
- [Asano and Otha, 2002] Asano, M. and Otha, H. (2002). “A Heuristic for Job Shop Scheduling to Minimize Total Weighted Tardiness”. *Computers & Industrial Engineering* 42(2-4):137-147 April 2002.
- [Balas, 1979] Balas, E., (1979), “Disjunctive programming” *Discrete Optimisation II*, 3-52.
- [Bin Jin, Luh, and Thakur, 1999] Bin Jin, Peter B. Luh, and L. S. Thakur (1999). “An Effective Optimization-Based Algorithm for Job Shop Scheduling with Fixed-Size Transfer Lots”. Volume 18, Issue 4, Pages 241-309 (1999)
- [Brucker, 2007] Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms*.
- [Calleja and Pastor, 2010] Calleja, G. and Pastor, R. (2010). Programación de la producción en paralelo con lotes de transferencia: un caso de estudio. XIV Congreso de Ingeniería de Organización pg 1757-1764.
- [Caseau and Laburthe] Caseau, Y., and Laburthe, F., (1994), “Improved CLP scheduling with task intervals *ICLP’94 Proceedings of the Eleventh International Conference on Logic Programming*.
- [Conway et. al, 1967] Conway, R. W., Maxwell, W. L., and Miller, L. W., (1967) *Theory of Scheduling*.
- [Cook, 1971] Cook, S. A., (1971), “The complexity of theorem proving procedures”, *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*, Association of Computing Machinery, New York, 151-158.
- [Cox and Spencer, 1992] Cox, J.F. and Spencer, M.S. (1992) *APICS Dictionary*.
- [Chung-Yee, Lei and Pinedo, 1997] Chung-Yee, L., Lei, L., Pinedo, M. L. (2007). Current trends in deterministic scheduling. *Annals of Operations Research* 70(1997) 1-41.
- [Demirkol et. al, 1997] Demirkol, E., Mehta, S. and Uzsoy, R. (1997) A Computational Study of Shifting Bottleneck Procedures for Shop Scheduling Problems, *Journal of Heuristics*, Winter, 3/2, 111-137.
- [Dorndorf and Pesch, 1995] Dorndorf, U., and Pesch, E., (1995), “Evolution based learning in a job-shop scheduling environment”, *Computers and Operations Research* 22/1, January, 25-40.
- [Fernandez-Viagas, 2015] Fernandez-Viagas, V. (2015). Tema 7. Métodos de Programación de la Producción: Exactos. Programación y Control de la Producción, 4º GIOI.
- [Framinan, Leisten and Ruíz, 2014] Framinan, J., Leisten, R. and Ruíz, R. (2014). *Manufacturing Scheduling*

Systems.

[Framinan, 2014] Framinan, J. (2014). Tema 1: Introducción a la Programación y Control de la Producción. Programación y control de la producción, 4º GIOI.

[Ferguson, 1996] Ferguson, T. S. (1996). Linear Programming: A Concise Introduction.

[Garey et. al, 1976] Garey, M. R., Johnson, D. S., and Sethi, R., (1976), “The complexity of flow shop and jobshop scheduling”, *Mathematics of Operations Research* 1/2, May, 117-129.

[Giffer and Tompson, 1960] Giffler, B., and Thompson, G. L., (1960), “Algorithms for solving production scheduling problems”, *Operations Research*, 8(4), 487-503.

[Glover, 1977] Glover, F., (1977), “Heuristics for integer programming using surrogate constraints”, *Decision Sciences* 8/1, 156-166.

[Grabot and Geneste, 1994] Grabot, B. and Geneste, L. (1994). Dispatching rules in scheduling Dispatching rules in scheduling: a fuzzy approach. *International Journal of Production Research* 1994 vol 32 n°4 903-915. 1994

[Graham et. al, 1979] Graham, R. L., Lawler E. L., Lenstra J. K. and Rinoooy Kan, A. H. K. (1979). Optimisation and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5:236-287.

[Graves, 1981] Graves, S.C. (1981). A Review of Production Scheduling. *Operations Research* Volume 29, *Operations Management* (Jul.-Aug, 1981).

[Harjunkski et al. 2000] Harjunkski, I., Jain, V., Grossmann, I. (2000). Hybrid Mixed Integer/constraint Logic Programming Strategies for Solving Scheduling and Combinatorial Optmization Problems. *Comp. Chem. Eng.*, 24, 337-343, 2000.

[Herrmann, 2006] Herrman, J. W. (2006). Handbook of Production Scheduling.

[Hillier and Lieberman, 2010] Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la Investigación de Operaciones.

[Jain and Meeran, 1998] Jain, A. S. and Meeran, S. (1998). Deterministic Job-Shop Scheduling: Past, Present and Future.

[Jackson, 1956] Jackson, J. R. (1956), “An extension of Johnson’s result on job lot scheduling”, *Nav. Res.Logist. Quart.* 3/3, 201-203.

[Johnson, 1954] Johnson, S. M. (1954). Optimal Two and Three Stage Production Chedules With Set-Up Time Included. *Naval Research Logistics Quarterly* 1(1):61 – 68.

[Kolonko, 1998] Kolonko, M., (1998), “Some new results on simulated annealing applied to the job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*.

- [Larrosa, Oliveras and Rodríguez-Carbonell, 2015] Larrosa, J., Oliveras, A. and Rodríguez-Carbonell, E. (2015) Mixed Integer Linear Programming.
- [Lawler, Lenstra , Rinnooy Kan and Shmoys, 1993] Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. and Shmoys, D. B. (1993). Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity.
- [Lozano, 2015] Lozano, S. (2015). Optimización Multiobjetivo. Métodos de Optimización, 4ºGIOI.
- [Mahon and Florian, 1975] Mahon, G. and Florian, M. (1975). On Scheduling with Ready Times and Dates to Minimize Maximum Lateness. *Operations Research*. 23, 475-482.
- [Manne, 1960] Manne A. S. (1960). On the Job-Shop Scheduling Problem. *Operation Research*, 219-223.
- [Mattfeld et al.1998] Mattfeld, D. C., Bierwirth, C., and Kopfer, H., (1998), A Search Space Analysis of the Job Shop Scheduling Problem. *Annals of Operations Research*.
- [Nakano and Yamada, 1991] Nakano, R., and Yamada, T., (1991), “Conventional genetic algorithm for job-shop problems, *Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, San Diego, California, USA, 474-479.
- [Mattfeld, 1996] Mattfeld, D. C., (1996), “Evolutionary Search and the Job Shop: Investigations on Genetic Algorithms for Production Scheduling”, Physica-Verlag, Heidelberg, Germany.
- [Narzisi, 2008] Narzisi, G. (2008). Multi-Objective Optimization: A Quick Introduction.
- [Nowichi, 1996] Nowicki, E., and Smutnicki, C., (1996), “A fast taboo search algorithm for the job-shop problem”, *Management Science* 42/6, June, 797-813.
- [Romo de Vivar, 2015] Romo de Vivar, A. (2015). Modelado y resolución de problema de carga de máquinas en talleres con rutas alternativas. Aplicación a una empresa de fabricación de electrodos.
- [Roscoe, Freark and Irwin, 1971] Roscoe, E. S., Freark, D. G. and Irwin, R. D. (1971). Organization for Production; an Introduction to Industrial Management.
- [Roy and Sussmann, 1964] Roy, B., and Sussmann, B., (1964), “Les problèmes d’ordonnancement avec contraintes disjonctives”, Note D.S. no. 9 bis, SEMA.
- [Strayer, 1989] Strayer, J. K. (1989). Linear Programming and Applications.
- [Werner and Winkler, 1995] Werner, F., and Winkler, A., (1995), Insertion techniques for the heuristic solution of the jobshop problem”, *Discrete Applied Mathematics*, 58/2, 191-211.
- [Yamada and Nakano, 1996] Yamada, T., and Nakano, R., (1996), “Job-shop scheduling by simulated annealing combined with deterministic local search”, *Meta-heuristics: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, MA, USA, 237-248.

## 9.1 ANEXO 1: CÓDIGO LINGO EJEMPLOS 1 Y 2 Y ESCENARIOS 1-4

### 9.1.1 MODELO DE EJEMPLO 1

```

SETS:
OPER/1..8/:TIME,START,STARTP,COMPLETION,SETUP;
PIEC1(OPER)/1,2/;
PIEC2(OPER)/3,4/;
PIEC3(OPER)/5,6/;
PIEC4(OPER)/7,8/;
MACH1(OPER)/2,5/;
MACH2(OPER)/1,4/;
MACH3(OPER)/3,7/;
MACH4(OPER)/6,8/;
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;
ENDSETS
DATA:
TIME=
69      30      160      235      76      172      117      18
;
SETUP=
1        2        2        1        3        2        1        1
;
LARGE= 1000000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):COMPLETION(R));
@FOR (OPER(R):STARTP(R)= START(R)+ SETUP(R);COMPLETION(R)= STARTP(R) + TIME(R));
@FOR(PIEC1(R):@FOR(PIEC1(RP) | R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC2(R):@FOR(PIEC2(RP) | R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC3(R):@FOR(PIEC3(RP) | R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC4(R):@FOR(PIEC4(RP) | R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(MACH1(R):@FOR(MACH1(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));));
@FOR(MACH2(R):@FOR(MACH2(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));));
@FOR(MACH3(R):@FOR(MACH3(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));));
@FOR(MACH4(R):@FOR(MACH4(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));));
@FOR(OPER(R):CMAX >= COMPLETION(R));
DATA:
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('El ultimo trabajo de la serie termina en:',CMAX,@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 1:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC1(R):STARTP(R),',',START(R),',',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC2(R):STARTP(R),',',START(R),',',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 3:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC3(R):STARTP(R),',',START(R),',',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 4:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC4(R):STARTP(R),',',START(R),',',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

### 9.1.2 MODELO DE EJEMPLO 2

```

SETS:
OPER/1..8/:SETUP;
DEML0T/1..5/;
PIEC1(OPER)/1,2/;
PIEC2(OPER)/3,4/;
PIEC3(OPER)/5,6/;
PIEC4(OPER)/7,8/;
OPERM1(OPER)/2,5/;

```

```

OPERM2(OPER)/1,4/;
OPERM3(OPER)/3,7/;
OPERM4(OPER)/6,8/;
GENER(OPER,DEMLOT): TIME,START,COMPLETION;
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;
ENDSETS
DATA:
TIME=
24      23      23      0      0
12      10      10      0      0
34      32      32      32     32
48      47      47      47     47
22      19      19      19      0
45      43      43      43      0
40      39      39      0      0
7       6       6       0      0
;
LARGE= 1000000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):@SUM(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)));
@FOR (OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)= START(R,D) + TIME(R,D)));
!Restricciones de homologas en otras maquinas;
@FOR(PIEC1(R):@FOR(PIEC1(RP)|RP#EQ#R+1:
@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D))););
@FOR(PIEC2(R):@FOR(PIEC2(RP)|RP#EQ#R+1:
@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D))););
@FOR(PIEC3(R):@FOR(PIEC3(RP)|RP#EQ#R+1:
@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D))););
@FOR(PIEC4(R):@FOR(PIEC4(RP)|RP#EQ#R+1:
@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D))););
!Restricciones de intralote;
@FOR(DEMLOT(D):@FOR(DEMLOT(DP)|DP#EQ#D+1:@FOR(OPER(R):
START(R,DP) >= COMPLETION(R,D))););
!Restricciones de lotes diferentes en maquinas;
@FOR(OPERM1(R):@FOR(OPERM1(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,5)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,5)- LARGE*(1-Y(R,RP))););
@FOR(OPERM2(R):@FOR(OPERM2(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,5)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,5)- LARGE*(1-Y(R,RP))););
@FOR(OPERM3(R):@FOR(OPERM3(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,5)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,5)- LARGE*(1-Y(R,RP))););
@FOR(OPERM4(R):@FOR(OPERM4(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,5)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,5)- LARGE*(1-Y(R,RP))););
!Calculo de CMAX;
@FOR(OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):CMAX >= COMPLETION(R,D)));
DATA:
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 1, maquina 2:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#3:DEMLOT(D), '|',START(1,D), '/',COMPLETION(1,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 1, maquina 1:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#3:DEMLOT(D), '|',START(2,D), '/',COMPLETION(2,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 2, maquina 3:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#5:DEMLOT(D), '|',START(3,D), '/',COMPLETION(3,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 2, maquina 2:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#5:DEMLOT(D), '|',START(4,D), '/',COMPLETION(4,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 3, maquina 1:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#4:DEMLOT(D), '|',START(5,D), '/',COMPLETION(5,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 3, maquina 4:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#4:DEMLOT(D), '|',START(6,D), '/',COMPLETION(6,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 4, maquina 3:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=
@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#3:DEMLOT(D), '|',START(7,D), '/',COMPLETION(7,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 4, maquina 4:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=

```

```

@WRITEFOR (DEML0T(D)|D#LE#3:DEML0T(D),'|',START(8,D),'/',COMPLETION(8,D),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

### 9.1.3 MODELO DE ESCENARIO 1

```

SETS:
OPER/1..26/:TIME,START,STARTP,COMPLETION,SETUP;
PIEC1(OPER)/1,2/;
PIEC2(OPER)/3/;
PIEC3(OPER)/4/;
PIEC4(OPER)/5/;
PIEC5(OPER)/6,7/;
PIEC6(OPER)/8,9/;
PIEC7(OPER)/10/;
PIEC8(OPER)/11,12/;
PIEC9(OPER)/13/;
PIEC10(OPER)/14,15/;
PIEC11(OPER)/16,17/;
PIEC12(OPER)/18,19/;
PIEC13(OPER)/20,21/;
PIEC14(OPER)/22/;
PIEC15(OPER)/23/;
PIEC16(OPER)/24/;
PIEC17(OPER)/25/;
PIEC18(OPER)/26/;
MACH1(OPER)/13/;
MACH2(OPER)/7,10,15,19,23,24,26/;
MACH3(OPER)/3,5,6,16,20/;
MACH4(OPER)/22/;
MACH5(OPER)/9,12,25/;
MACH6(OPER)/2,17,18,21/;
MACH7(OPER)/4,11,14/;
MACH8(OPER)/8/;
MACH9(OPER)/1/;
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;
ENDSETS
DATA:
TIME=
1472.5 961 420 1000 400 420 250 1875 850 500 720 1044 2184
441 360 644 840 182 378 329 189 2124 124.8 459.6 275
126;
SETUP=
7 6 6 6 5 12 4 5 3 11 5 3 8 5
5 9 5 11 5 15 0 19 10 5 19 4;
LARGE= 1000000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):COMPLETION(R));
@FOR (OPER(R):STARTP(R)= START(R)+ SETUP(R);COMPLETION(R)= STARTP(R) + TIME(R));
@FOR(PIEC1(R):@FOR(PIEC1(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC2(R):@FOR(PIEC2(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC3(R):@FOR(PIEC3(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC4(R):@FOR(PIEC4(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC5(R):@FOR(PIEC5(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC6(R):@FOR(PIEC6(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC7(R):@FOR(PIEC7(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC8(R):@FOR(PIEC8(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC9(R):@FOR(PIEC9(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC10(R):@FOR(PIEC10(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC11(R):@FOR(PIEC11(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC12(R):@FOR(PIEC12(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC13(R):@FOR(PIEC13(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC14(R):@FOR(PIEC14(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC15(R):@FOR(PIEC15(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC16(R):@FOR(PIEC16(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC17(R):@FOR(PIEC17(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(PIEC18(R):@FOR(PIEC18(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R));););
@FOR(MACH1(R):@FOR(MACH1(RP)| R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH2(R):@FOR(MACH2(RP)| R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(MACH3(R):@FOR(MACH3(RP)| R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(MACH4(R):@FOR(MACH4(RP)| R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);

```

```

START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP)););
@FOR(MACH5(R):@FOR(MACH5(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH6(R):@FOR(MACH6(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH7(R):@FOR(MACH7(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH8(R):@FOR(MACH8(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH9(R):@FOR(MACH9(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPER(R):CMAX >= COMPLETION(R)););
DATA:
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('El ultimo trabajo de la serie termina en:',CMAX,@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('La distribución por maquinas es la siguiente:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 1');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH1(R): 1*' ',MACH1(R),1*' ', STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 2');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH2(R): 1*' ',MACH2(R),1*' ', STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 3');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH3(R): 1*' ',MACH3(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 4');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH4(R): 1*' ',MACH4(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 5');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH5(R): 1*' ',MACH5(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 6');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH6(R): 1*' ',MACH6(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 7');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH7(R): 1*' ',MACH7(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 8');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH8(R): 1*' ',MACH8(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 9');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH9(R): 1*' ',MACH9(R),1*' ',
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 1:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC1(R):'Trabajo',1*' ',PIEC1(R),1*' '
,STARTP(R),'; ', START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC2(R):'Trabajo',1*' ',PIEC2(R),1*' '
,STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 3:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC3(R):'Trabajo',1*' ',PIEC3(R),1*' '
,STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 4:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC4(R):'Trabajo',1*' ',PIEC4(R),1*' '
,STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 5:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC5(R):'Trabajo',1*' ',PIEC5(R),1*' '
,STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 6:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC6(R):'Trabajo',1*' ',PIEC6(R),1*' '
,STARTP(R),'; '
,START(R),'/ ',COMPLETION(R),2*' '););
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 7:',@NEWLINE(1));

```

```

@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC7(R):'Trabajo',1*' ', PIEC7(R),1*' ', STARTP(R),' ;
',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 8:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC8(R):'Trabajo',1*' ', PIEC8(R),1*' ', STARTP(R),' ;
',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 9:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC9(R):'Trabajo',1*' ', PIEC9(R),1*' ', STARTP(R),' ;
',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 10:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC10(R):'Trabajo',1*' ', PIEC10(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 11:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC11(R):'Trabajo',1*' ', PIEC11(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 12:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC12(R):'Trabajo',1*' ', PIEC12(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 13:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC13(R):'Trabajo',1*' ', PIEC13(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 14:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC14(R):'Trabajo',1*' ', PIEC14(R),1*' ', STARTP(R),'
; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 15:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC15(R):'Trabajo',1*' ', PIEC15(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 16:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC16(R):'Trabajo',1*' ', PIEC16(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 17:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC17(R):'Trabajo',1*' ', PIEC17(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 18:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC18(R):'Trabajo',1*' ', PIEC18(R),1*' ',
STARTP(R),' ; ',START(R),'/',COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

## 9.1.4 MODELO DE ESCENARIO 2

### SETS:

```

OPER/1..49/:TIME,START,STARTP,SETUP,COMPLETION;
PIEC11(OPER)/1,2/;
PIEC12(OPER)/3/;
PIEC21(OPER)/4/;
PIEC22(OPER)/5/;
PIEC31(OPER)/6/;
PIEC32(OPER)/7/;
PIEC41(OPER)/8/;
PIEC42(OPER)/9/;
PIEC51(OPER)/10,11/;
PIEC52(OPER)/12/;
PIEC61(OPER)/13,14/;
PIEC62(OPER)/15/;
PIEC71(OPER)/16/;
PIEC72(OPER)/17/;
PIEC81(OPER)/18,19/;
PIEC82(OPER)/20,21/;
PIEC91(OPER)/22/;
PIEC92(OPER)/23/;
PIEC101(OPER)/24,25/;
PIEC102(OPER)/26,27/;
PIEC111(OPER)/28,29/;
PIEC112(OPER)/30,31/;

```

```

PIEC121(OPER)/32,33/;
PIEC122(OPER)/34,35/;
PIEC131(OPER)/36,37/;
PIEC132(OPER)/38,39/;
PIEC141(OPER)/40/;
PIEC142(OPER)/41/;
PIEC151(OPER)/42/;
PIEC152(OPER)/43/;
PIEC161(OPER)/44/;
PIEC162(OPER)/45/;
PIEC171(OPER)/46/;
PIEC172(OPER)/47/;
PIEC181(OPER)/48/;
PIEC182(OPER)/49/;
MACH1(OPER)/3,22/;
MACH2(OPER)/7,11,16,21,23,25,31,33,34,39,41,42,44,48/;
MACH3(OPER)/4,8,10,20,26,28,36/;
MACH4(OPER)/12,15,40/;
MACH5(OPER)/14,19,46/;
MACH6(OPER)/2,17,27,29,32,35,37,43,45,47,49/;
MACH7(OPER)/5,6,9,18,24,30,38/;
MACH8(OPER)/13/;
MACH9(OPER)/1/;
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;

```

ENDSETS

DATA:

|        |        |     |      |     |     |       |     |      |     |      |     |      |
|--------|--------|-----|------|-----|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|------|
| TIME=  | 1425   | 930 | 30   | 420 | 0   | 880   | 66  | 400  | 0   | 0    | 0   | 100  |
|        | 1462.5 | 663 | 220  | 0   | 130 | 300   | 435 | 73.5 | 126 | 1794 | 170 | 0    |
|        | 375    | 180 | 69   | 90  | 425 | 175   | 182 | 378  | 0   | 0    | 0   | 0    |
|        | 70     | 119 | 1357 | 260 | 0   | 131.2 | 459 | 0    | 110 | 34.5 | 0   | 159; |
| SETUP= | 7      | 6   | 10   | 6   | 0   | 6     | 5   | 5    | 0   | 0    | 0   | 7    |
|        | 3      | 7   | 0    | 0   | 5   | 3     | 3.5 | 4    | 8   | 4    | 0   | 0    |
|        | 0      | 9   | 5    | 0   | 5   | 11    | 5   | 0    | 0   | 0    | 0   | 5    |
|        | 19     | 4   | 0    | 0   | 5   | 0     | 19  | 0    | 0   | 0    | 0   | 5    |

LARGE= 1000000000;

ENDDATA

MIN= FO;

FO=CMAX+0.00001\* @SUM(OPER(R):COMPLETION(R));

@FOR (OPER(R):STARTP(R)= START(R)+SETUP(R);

COMPLETION(R)= STARTP(R) + TIME(R));

```

@FOR(PIEC11(R):@FOR(PIEC11(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC12(R):@FOR(PIEC12(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC21(R):@FOR(PIEC21(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC22(R):@FOR(PIEC22(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC31(R):@FOR(PIEC31(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC32(R):@FOR(PIEC32(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC41(R):@FOR(PIEC41(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC42(R):@FOR(PIEC42(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC51(R):@FOR(PIEC51(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC52(R):@FOR(PIEC52(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC61(R):@FOR(PIEC61(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC62(R):@FOR(PIEC62(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC71(R):@FOR(PIEC71(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC72(R):@FOR(PIEC72(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC81(R):@FOR(PIEC81(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC82(R):@FOR(PIEC82(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC91(R):@FOR(PIEC91(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC92(R):@FOR(PIEC92(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC101(R):@FOR(PIEC101(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC102(R):@FOR(PIEC102(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC111(R):@FOR(PIEC111(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC112(R):@FOR(PIEC112(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC121(R):@FOR(PIEC121(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC122(R):@FOR(PIEC122(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC131(R):@FOR(PIEC131(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC132(R):@FOR(PIEC132(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC141(R):@FOR(PIEC141(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC142(R):@FOR(PIEC142(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC151(R):@FOR(PIEC151(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC152(R):@FOR(PIEC152(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC161(R):@FOR(PIEC161(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC162(R):@FOR(PIEC162(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC171(R):@FOR(PIEC171(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC172(R):@FOR(PIEC172(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC181(R):@FOR(PIEC181(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(PIEC182(R):@FOR(PIEC182(RP)| R #LT# RP:START(RP) >= COMPLETION(R)););
@FOR(MACH1(R):@FOR(MACH1(RP)| R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP)- LARGE*Y(R,RP);

```

```

START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP)););
@FOR(MACH2(R):@FOR(MACH2(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH3(R):@FOR(MACH3(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH4(R):@FOR(MACH4(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH5(R):@FOR(MACH5(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH6(R):@FOR(MACH6(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH7(R):@FOR(MACH7(RP) | R #LT# RP: START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH8(R):@FOR(MACH8(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(MACH9(R):@FOR(MACH9(RP) | R #LT# RP:START(R) >= COMPLETION(RP) - LARGE*Y(R,RP);
START(RP) >= COMPLETION(R) - LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPER(R): CMAX >= COMPLETION(R););
DATA:
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('El ultimo trabajo de la serie termina en:',CMAX,@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('La distribución por maquinas es la siguiente:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 1');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH1(R): 1* ' ',MACH1(R),1* ' ', STARTP(R),' ; '
,START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));

@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 2');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH2(R): 1* ' ',MACH2(R),1* ' ', STARTP(R),' ; ' ,
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 3');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH3(R): 1* ' ',MACH3(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 4');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH4(R): 1* ' ',MACH4(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 5');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH5(R): 1* ' ',MACH5(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 6');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH6(R): 1* ' ',MACH6(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 7');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH7(R): 1* ' ',MACH7(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 8');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH8(R): 1* ' ',MACH8(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Maq 9');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(MACH9(R): 1* ' ',MACH9(R),1* ' ',
START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 1:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC11(R):'Trabajo',1* ' ', PIEC11(R),1* ' '
,STARTP(R),' ; ' , START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC12(R):'Trabajo',1* ' ', PIEC12(R),1* ' '
,STARTP(R),' ; ' , START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 2:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC21(R):'Trabajo',1* ' ', PIEC21(R),1* ' '
,STARTP(R),' ; ' , START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR(PIEC22(R):'Trabajo',1* ' ', PIEC22(R),1* ' '
,STARTP(R),' ; ' , START(R),'/',COMPLETION(R),2* ' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 3:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));

```



```

@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 13:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC131(R):'Trabajo',1*' ', PIEC131(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC132(R):'Trabajo',1*' ', PIEC132(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 14:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC141(R):'Trabajo',1*' ', PIEC141(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC142(R):'Trabajo',1*' ', PIEC142(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 15:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC151(R):'Trabajo',1*' ', PIEC151(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC152(R):'Trabajo',1*' ', PIEC152(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 16:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC161(R):'Trabajo',1*' ', PIEC161(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC162(R):'Trabajo',1*' ', PIEC162(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 17:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC171(R):'Trabajo',1*' ', PIEC171(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC172(R):'Trabajo',1*' ', PIEC172(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la pieza 18:',@NEWLINE(2));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC181(R):'Trabajo',1*' ', PIEC181(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITEFOR (PIEC182(R):'Trabajo',1*' ', PIEC182(R),1*' ',
,STARTP(R),';', START(R), '/' ,COMPLETION(R),2*' ');
@TEXT('solucionprueba.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

### 9.1.5 MODELO DE ESCENARIO 3

#### SETS:

```

OPER/1..26/:SETUP;
DEMLOT/1..56/;
PIEC1(OPER)/1,2/;
PIEC2(OPER)/3/;
PIEC3(OPER)/4/;
PIEC4(OPER)/5/;
PIEC5(OPER)/6,7/;
PIEC6(OPER)/8,9/;
PIEC7(OPER)/10/;
PIEC8(OPER)/11,12/;
PIEC9(OPER)/13/;
PIEC10(OPER)/14,15/;
PIEC11(OPER)/16,17/;
PIEC12(OPER)/18,19/;
PIEC13(OPER)/20,21/;
PIEC14(OPER)/22/;
PIEC15(OPER)/23/;
PIEC16(OPER)/24/;
PIEC17(OPER)/25/;
PIEC18(OPER)/26/;
OPERM1(OPER)/13/;

```





```

;
LARGE= 100000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):@SUM(DEMLOT(D): COMPLETION(R,D)););
@FOR (OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)= START(R,D) + TIME(R,D)););
!Restricciones de homologas en otras maquinas;
@FOR(PIEC1(R):@FOR(PIEC1(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC2(R):@FOR(PIEC2(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC3(R):@FOR(PIEC3(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC4(R):@FOR(PIEC4(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC5(R):@FOR(PIEC5(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC6(R):@FOR(PIEC6(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC7(R):@FOR(PIEC7(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC8(R):@FOR(PIEC8(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC9(R):@FOR(PIEC9(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC10(R):@FOR(PIEC10(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC11(R):@FOR(PIEC11(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC12(R):@FOR(PIEC12(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC13(R):@FOR(PIEC13(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC14(R):@FOR(PIEC14(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC15(R):@FOR(PIEC15(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC16(R):@FOR(PIEC16(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC17(R):@FOR(PIEC17(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC18(R):@FOR(PIEC18(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de intralote;
@FOR(DEMLOT(D):@FOR(DEMLOT(DP)|DP#EQ#D+1:@FOR(OPER(R):START(R,DP) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de lotes diferentes en maquinas;
@FOR(OPERM1(R):@FOR(OPERM1(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM2(R):@FOR(OPERM2(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM3(R):@FOR(OPERM3(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM4(R):@FOR(OPERM4(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM5(R):@FOR(OPERM5(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM6(R):@FOR(OPERM6(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM7(R):@FOR(OPERM7(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM8(R):@FOR(OPERM8(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
@FOR(OPERM9(R):@FOR(OPERM9(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,56)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,56)- LARGE*(1-Y(R,RP));););
!Calculo de CMAX;
@FOR(OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):CMAX >= COMPLETION(R,D)););
DATA:
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 1');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM1(R): 1* ' '
,OPERM1(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,56),2* ' ' );
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 2');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM2(R): 1* ' '
,OPERM2(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,56),2* ' ' );
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 3');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM3(R): 1* ' '
,OPERM3(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,56),2* ' ' );
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 4');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM4(R): 1* ' '
,OPERM4(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,56),2* ' ' );
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 5');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM5(R): 1* ' '
,OPERM5(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,56),2* ' ' );
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));

```



```

@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 11:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=
  @WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#28:
    DEMLOT(D),'|','START(16,D),'/',COMPLETION(16,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#28:
  DEMLOT(D),'|','START(17,D),'/',COMPLETION(17,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 12:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#14:
  DEMLOT(D),'|','START(18,D),'/',COMPLETION(18,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#14:
  DEMLOT(D),'|','START(19,D),'/',COMPLETION(19,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 13:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#7:
  DEMLOT(D),'|','START(20,D),'/',COMPLETION(20,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#7:
  DEMLOT(D),'|','START(21,D),'/',COMPLETION(21,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 14:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#36:
  DEMLOT(D),'|','START(22,D),'/',COMPLETION(22,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 15:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#8:
  DEMLOT(D),'|','START(23,D),'/',COMPLETION(23,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 16:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#12:
  DEMLOT(D),'|','START(24,D),'/',COMPLETION(24,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 17:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#5:
  DEMLOT(D),'|','START(25,D),'/',COMPLETION(25,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 18:',@NEWLINE(2));
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#10:
  DEMLOT(D),'|','START(26,D),'/',COMPLETION(26,D),2*' ');
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

## 9.1.6 MODELO DE ESCENARIO 4

### SETS:

```

OPER/1,2,3,4,6,7,8,12,13,14,15,17,18,19,20,21,22,23,26,27,28,29,30,31,32,33,38,39,40,41,43,44,46,
47,49/:SETUP;
DEMLOT/1..46/;
PIEC11(OPER)/1,2/;
PIEC12(OPER)/3/;
PIEC21(OPER)/4/;
PIEC31(OPER)/6/;
PIEC32(OPER)/7/;
PIEC41(OPER)/8/;
PIEC52(OPER)/12/;
PIEC61(OPER)/13,14/;
PIEC62(OPER)/15/;
PIEC72(OPER)/17/;
PIEC81(OPER)/18,19/;
PIEC82(OPER)/20,21/;
PIEC91(OPER)/22/;
PIEC92(OPER)/23/;
PIEC102(OPER)/26,27/;
PIEC111(OPER)/28,29/;
PIEC112(OPER)/30,31/;
PIEC121(OPER)/32,33/;
PIEC132(OPER)/38,39/;
PIEC141(OPER)/40/;
PIEC142(OPER)/41/;
PIEC152(OPER)/43/;
PIEC161(OPER)/44/;
PIEC171(OPER)/46/;
PIEC172(OPER)/47/;

```

```

PIEC182(OPER)/49/;
OPERM1(OPER)/3,22/;
OPERM2(OPER)/7,21,23,31,33,39,41,44/;
OPERM3(OPER)/4,8,20,26,28/;
OPERM4(OPER)/12,15,40/;
OPERM5(OPER)/14,19,46/;
OPERM6(OPER)/2,17,27,29,32,43,47,49/;
OPERM7(OPER)/6,18,30,38/;
OPERM8(OPER)/13/;
OPERM9(OPER)/1/;
GENER(OPER,DEMLOT): TIME,START,COMPLETION;
MACH1(OPERM1,DEMLOT);
MACH2(OPERM2,DEMLOT);
MACH3(OPERM3,DEMLOT);
MACH4(OPERM4,DEMLOT);
MACH5(OPERM5,DEMLOT);
MACH6(OPERM6,DEMLOT);
MACH7(OPERM7,DEMLOT);
MACH8(OPERM8,DEMLOT);
MACH9(OPERM9,DEMLOT);
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;

```

ENDSETS

DATA:

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| TIME=54.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 0 |
|           | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 0 |
|           | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 37        | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 0 |
|           | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 0 |
|           | 31   | 31   | 31   | 31   | 31   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 40        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 18        | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 0 |
|           | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 0 |
|           | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 26        | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0 |
|           | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0 |
|           | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0 |
|           | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 16        | 11   | 11   | 11   | 11   | 11   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 45        | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 17        | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 42.5      | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 0 |
|           | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 0 |
|           | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 0 |
|           | 37.5 | 37.5 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 20        | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 0 |
|           | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 0 |
|           | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 17   | 0 |
|           | 17   | 17   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 27        | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 13        | 13   | 13   | 13   | 13   | 13   | 13   | 13   | 13   | 13   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 25        | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 0 |
|           | 20   | 20   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
|           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 32        | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 29   | 0 |
|           | 29   | 29   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |



|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
| 11.5 | 11.5 | 11.5 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
| 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 15.9 | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |
|      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0 | 0 |

```

;
LARGE= 1000000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):COMPLETION(R,46));
@FOR (OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)= START(R,D) + TIME(R,D)););
!Restricciones de homologas en otras maquinas;
@FOR(PIEC11(R):@FOR(PIEC11(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC12(R):@FOR(PIEC12(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC21(R):@FOR(PIEC21(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC31(R):@FOR(PIEC31(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC32(R):@FOR(PIEC32(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC41(R):@FOR(PIEC41(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC52(R):@FOR(PIEC52(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC61(R):@FOR(PIEC61(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC62(R):@FOR(PIEC62(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC72(R):@FOR(PIEC72(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC81(R):@FOR(PIEC81(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC82(R):@FOR(PIEC82(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC91(R):@FOR(PIEC91(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC92(R):@FOR(PIEC92(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC102(R):@FOR(PIEC102(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC111(R):@FOR(PIEC111(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC112(R):@FOR(PIEC112(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC121(R):@FOR(PIEC121(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC132(R):@FOR(PIEC132(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC141(R):@FOR(PIEC141(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC142(R):@FOR(PIEC142(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC152(R):@FOR(PIEC152(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC161(R):@FOR(PIEC161(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC171(R):@FOR(PIEC171(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC172(R):@FOR(PIEC172(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC182(R):@FOR(PIEC182(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de intralote;
@FOR(DEMLOT(D):@FOR(DEMLOT(DP)|DP#EQ#D+1:@FOR(OPER(R):START(R,DP) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de lotes diferentes en maquinas;
@FOR(OPERM1(R):@FOR(OPERM1(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM2(R):@FOR(OPERM2(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM3(R):@FOR(OPERM3(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM4(R):@FOR(OPERM4(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM5(R):@FOR(OPERM5(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM6(R):@FOR(OPERM6(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM7(R):@FOR(OPERM7(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM8(R):@FOR(OPERM8(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM9(R):@FOR(OPERM9(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,46)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,46)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
!Calculo de CMAX;
@FOR(OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):CMAX >= COMPLETION(R,D)););
DATA:
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 1');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM1(R): 1* ' '
,OPERM1(R),1* ' ' , START(R,1), '/', COMPLETION(R,46), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 2');

```





```

        DEMLOT(D), '|', START(27,D), '/', COMPLETION(27,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#7:
        DEMLOT(D), '|', START(28,D), '/', COMPLETION(28,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 14:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#23:
        DEMLOT(D), '|', START(29,D), '/', COMPLETION(29,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));

@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#13:
        DEMLOT(D), '|', START(30,D), '/', COMPLETION(30,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 15:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));

@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#8:
        DEMLOT(D), '|', START(31,D), '/', COMPLETION(31,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 16:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#12:
        DEMLOT(D), '|', START(32,D), '/', COMPLETION(32,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 17:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#2:
        DEMLOT(D), '|', START(33,D), '/', COMPLETION(33,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#3:
        DEMLOT(D), '|', START(34,D), '/', COMPLETION(34,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 18:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#10:
        DEMLOT(D), '|', START(35,D), '/', COMPLETION(35,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

## 9.1.7 MODELO DE ESCENARIO 4

### SETS:

```

OPER/1,2,3,4,6,7,8,12,13,14,15,17,18,19,20,21,22,23,26,27,28,29,30,31,32,33,38,39,40,41,43,44,46,
47,49/:SETUP;
DEMLOT/1..21/;
MULTIRUT/1,2,13,14,18,19,20,21,26,27,28,29,30,31,38,39/;
MONORUT/3,4,6,7,8,12,15,17,22,23,32,33,40,41,43,44,46,47,49/;
PIEC11(OPER)/1,2/;
PIEC12(OPER)/3/;
PIEC21(OPER)/4/;
PIEC31(OPER)/6/;
PIEC32(OPER)/7/;
PIEC41(OPER)/8/;
PIEC52(OPER)/12/;
PIEC61(OPER)/13,14/;
PIEC62(OPER)/15/;
PIEC72(OPER)/17/;
PIEC81(OPER)/18,19/;
PIEC82(OPER)/20,21/;
PIEC91(OPER)/22/;
PIEC92(OPER)/23/;
PIEC102(OPER)/26,27/;
PIEC111(OPER)/28,29/;
PIEC112(OPER)/30,31/;
PIEC121(OPER)/32,33/;
PIEC132(OPER)/38,39/;
PIEC141(OPER)/40/;
PIEC142(OPER)/41/;
PIEC152(OPER)/43/;
PIEC161(OPER)/44/;

```

```

PIEC171(OPER)/46/;
PIEC172(OPER)/47/;
PIEC182(OPER)/49/;
OPERM1(OPER)/3,22/;
OPERM2(OPER)/7,21,23,31,33,39,41,44/;
OPERM3(OPER)/4,8,20,26,28/;
OPERM4(OPER)/12,15,40/;
OPERM5(OPER)/14,19,46/;
OPERM6(OPER)/2,17,27,29,32,43,47,49/;
OPERM7(OPER)/6,18,30,38/;
OPERM8(OPER)/13/;
OPERM9(OPER)/1/;
GENER(OPER,DEMLOT): TIME,START,COMPLETION;
PRECEDENCE(OPER,OPER):Y;

```

ENDSETS

DATA:

```

TIME=529.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5
              47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    47.5    0
347          31     31     31     31     31     31     31     31     31     31     31     31
              31     31     31     31     31     31     31     31     0
40           0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
426          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
886          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
71           0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
405          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
107          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0     0
830          37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   37.5
              37.5   37.5   37.5   37.5   37.5   0     0     0
377          17     17     17     17     17     17     17     17     17     17     17     17
              17     17     17     17     17     0     0     0
227          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
13           13     13     13     13     13     13     13     13     13     13     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
25           20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20
              20     20     0     0     0     0     0     0
32           29     29     29     29     29     29     29     29     29     29     29     29
              29     29     0     0     0     0     0     0
7            3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5
              3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5    3.5
10           6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6
              6     6     6     6     6     6     6     6
1802         0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
174          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
206          12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5   12.5
              12.5   12.5   0     0     0     0     0     0
96           6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6     6
              6     0     0     0     0     0     0     0
32           23     23     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
35           30     30     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
255          17     17     17     17     17     17     17     17     17     17     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
110          7     7     7     7     7     7     7     7     7     7     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
24           13     13     13     13     13     13     13     13     13     13     13     13
              13     0     0     0     0     0     0     0
32           27     27     27     27     27     27     27     27     27     27     27     27
              27     0     0     0     0     0     0     0
15           10     10     10     10     10     10     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
22           17     17     17     17     17     17     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
1376         0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0
264          0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0
              0     0     0     0     0     0     0     0

```

```

131.2  0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
464    0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
129    0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
34.5   0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
159    0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
;
LARGE= 1000000000;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=CMAX+0.00001* @SUM(OPER(R):COMPLETION(R,21));
@FOR (OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)= START(R,D) + TIME(R,D)););
!Restricciones de homologas en otras maquinas;
@FOR(PIEC11(R):@FOR(PIEC11(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC12(R):@FOR(PIEC12(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC21(R):@FOR(PIEC21(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC31(R):@FOR(PIEC31(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC32(R):@FOR(PIEC32(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC41(R):@FOR(PIEC41(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC52(R):@FOR(PIEC52(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC61(R):@FOR(PIEC61(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC62(R):@FOR(PIEC62(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC72(R):@FOR(PIEC72(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC81(R):@FOR(PIEC81(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC82(R):@FOR(PIEC82(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC91(R):@FOR(PIEC91(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC92(R):@FOR(PIEC92(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D));););
@FOR(PIEC102(R):@FOR(PIEC102(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC111(R):@FOR(PIEC111(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC112(R):@FOR(PIEC112(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC121(R):@FOR(PIEC121(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC132(R):@FOR(PIEC132(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC141(R):@FOR(PIEC141(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC142(R):@FOR(PIEC142(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC152(R):@FOR(PIEC152(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC161(R):@FOR(PIEC161(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC171(R):@FOR(PIEC171(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC172(R):@FOR(PIEC172(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
@FOR(PIEC182(R):@FOR(PIEC182(RP)|RP#EQ#R+1:@FOR(DEMLOT(D):START(RP,D) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de intralote;
@FOR(DEMLOT(D):@FOR(DEMLOT(DP)|DP#EQ#D+1:@FOR(OPER(R):START(R,DP) >= COMPLETION(R,D)););););
!Restricciones de lotes diferentes en maquinas;
@FOR(OPERM1(R):@FOR(OPERM1(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM2(R):@FOR(OPERM2(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM3(R):@FOR(OPERM3(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM4(R):@FOR(OPERM4(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM5(R):@FOR(OPERM5(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM6(R):@FOR(OPERM6(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM7(R):@FOR(OPERM7(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM8(R):@FOR(OPERM8(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
@FOR(OPERM9(R):@FOR(OPERM9(RP)|R #LT# RP:START(R,1) >= COMPLETION(RP,21)- LARGE*Y(R,RP);
START(RP,1) >= COMPLETION(R,21)- LARGE*(1-Y(R,RP)););););
!Calculo de CMAX;
@FOR(OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):CMAX >= COMPLETION(R,D)););
DATA:
@TEXT('Sin rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 1');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM1(R): 1* ' '
,OPERM1(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,21),2* ' ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Maq 2');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR(OPERM2(R): 1* ' '
,OPERM2(R),1* ' ' , START(R,1),'/',COMPLETION(R,21),2* ' ' ');

```





```

@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#7:
      DEMLOT(D), '|', START(28,D), '/', COMPLETION(28,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 14:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(29,D), '/', COMPLETION(29,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(30,D), '/', COMPLETION(30,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 15:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(31,D), '/', COMPLETION(31,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 16:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(32,D), '/', COMPLETION(32,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 17:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(33,D), '/', COMPLETION(33,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(34,D), '/', COMPLETION(34,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la pieza 18:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('Para la ruta 2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#1:
      DEMLOT(D), '|', START(35,D), '/', COMPLETION(35,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(2));
ENDDATA
@FOR(PRECEDENCE:@BIN(Y));

```

## 9.1.8 MODELO DE LINGO DE APOYO A ESCENARIO 4, ANÁLISIS DE MODELO 2

```

SETS:
OPER/1,2,3,4/;
DEMLOT/1..39/;
GENER(OPER,DEMLOT): TIME,START,COMPLETION;
ENDSETS
DATA:
TIME=
54.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5
47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  47.5
47.5  47.5  47.5  47.5  47.5  0  0  0  0  0  0  0  0
0
42.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5
37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5  37.5
37.5  37.5
18.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5
12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  12.5
12.5  12.5  12.5  12.5  12.5  0  0  0  0  0  0  0
0
17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17
17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17  17
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
;
ENDDATA
MIN= FO;
FO=@SUM(OPER(R):COMPLETION(R,39));
@FOR (OPER(R):@FOR(DEMLOT(D):COMPLETION(R,D)= START(R,D) + TIME(R,D)););
@FOR(DEMLOT(D):@FOR(DEMLOT(DP)|DP#EQ#D+1:@FOR(OPER(R):START(R,DP) >= COMPLETION(R,D));));
DATA:
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('1.1:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLOT(D)|D#LE#30:
      DEMLOT(D), '|', START(1,D), '/', COMPLETION(1,D), 2* ' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('6.1:',@NEWLINE(1));

```

```
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLLOT(D)|D#LE#39:
    DEMLOT(D),'|',START(2,D),'/',COMPLETION(2,D),2*' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('10.2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLLOT(D)|D#LE#30:
    DEMLOT(D),'|',START(3,D),'/',COMPLETION(3,D),2*' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE('11.2:',@NEWLINE(1));
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITEFOR (DEMLLOT(D)|D#LE#25:
    DEMLOT(D),'|',START(4,D),'/',COMPLETION(4,D),2*' ');
@TEXT('Con rutas y Lote de transferencia, solución.txt')=@WRITE(@NEWLINE(1));
ENDDATA
```