

Proyecto Fin de Máster  
Máster en Organización Industrial y Gestión de  
Empresas.

Modelado y resolución de problemas de carga de  
máquinas en talleres con rutas alternativas. Aplicación  
a una empresa de fabricación de electrodos

Autor: Arturo Romo de Vivar Reta

Tutor: Dr. Ignacio Eguía Salinas

Dep. de Organización Industrial y Gestión de  
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2015





Proyecto Fin de Máster  
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

**Modelado y resolución de problemas de carga de  
máquinas en talleres con rutas alternativas.  
Aplicación a una empresa de fabricación de  
electrodos**

Autor:

Arturo Romo de Vivar Reta

Tutor:

Dr. Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



# AGRADECIMIENTOS

---

Antes de comenzar con este trabajo quisiera agradecer a todas las personas y organismos involucrados y sin los cuales la realización de este proyecto no hubiera sido posible.

En principio agradecer a mi familia, mi apoyo más grande en todo momento, siempre me han alentado a seguir y persistir para alcanzar el objetivo. Gracias por guiarme cuando no veía las cosas con claridad y por estar siempre ahí a pesar de las muchas horas que estuve ausente por dedicarle tiempo al proyecto.

Por supuesto, agradecer a mi tutor Ignacio Eguía, quien se ha tomado el tiempo para ayudarme a comprender los aspectos y conceptos necesarios para desarrollar el proyecto pero sobretodo mostrar entusiasmo por mi proyecto, lo cual me motivaba cuando sentía que iba caminando por callejones sin salida.

Por último agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que a través de su programa de apoyo a estudiantes de posgrado, han financiado tanto mis estudios como mi estancia a lo largo de estos dos años. Sin duda alguna de no haber sido por el apoyo económico que se me ha brindado no hubiera sido posible el costearme estudiar y vivir en el extranjero. Agradezco encarecidamente el apoyo y la confianza para formar parte de la gran comunidad de beneficiados por este tipo de apoyos y subvenciones.

*Arturo Romo de Vivar Reta*  
*Sevilla, 2015*

# RESUMEN

---

En este trabajo de fin de Máster se aborda el problema carga de máquinas con rutas alternativas para talleres con configuración tipo Job-Shop.

El enfoque principal se basa en la existencia de rutas alternativas para la fabricación de distintos pedidos dentro de un horizonte de planificación.

Se considera dentro del sistema de fabricación los tiempos de Set-Up de las máquinas así como la vida útil de las herramientas empleadas.

El objetivo es conseguir un equilibrio del sistema a través del uso de una mezcla de rutas posibles y una combinación óptima de las herramientas empleadas para lograr fabricar la mayor cantidad de pedidos posible.

Para ello se desarrolló un modelo de Programación Lineal Mixta Entera con el cual se determina la ruta o mezcla de rutas óptimas por la cual deberán pasar los pedidos para su fabricación.

El modelo se valida con una aplicación real en una fábrica de Electroodos en un horizonte de planificación semanal. Se realiza un análisis de sensibilidad sobre parámetros del modelo.

# ÍNDICE

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.1 INTODUCCIÓN	12
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	14
<b>2. LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
2.1 INTRODUCCIÓN	16
2.2 LA PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA.	16
2.2.1 <i>MANUFACTURA BASADA EN EL PRODUCTO.</i>	18
2.2.2 <i>ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MANUFACTURA.</i>	18
2.3 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.	19
2.3.1 <i>EL CONCEPTO DE PLANIFICACIÓN.</i>	20
2.3.2 <i>PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD.</i>	22
2.3.3 <i>PLANIFICACIÓN CONTRA PEDIDO.</i>	22
2.3.4 <i>MAKE TO ORDER.</i>	24
2.4 PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN	24
2.4.1 <i>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN.</i>	25
2.4.2 <i>SELECCIÓN Y DISEÑO DE PROCESO.</i>	26
2.4.3 <i>PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA: SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS).</i>	27
2.4.3.1 <i>MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).</i>	27
2.4.4 <i>CUMPLIMIENTO DE LAS ENTREGAS.</i>	27
2.5 EL CONCEPTO DEL JOB SHOP.	29
2.6 CARGA DE MÁQUINAS.	30
<b>3. CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PEDIDOS: ESTADO DEL ARTE</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.	31
3.2 EL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS (MACHINE LOADING PROBLEM).	31
3.3 SELECCIÓN DE PRODUCTOS (PART TYPE SELECTION).	32
3.4 SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (SFF)	33
3.5 PROGRAMACIÓN LINEAL.	35
3.6 PROGRAMACIÓN LINEAL MIXTA ENTERA	36
3.7 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN ENTORNOS DE SFF.	37
3.7.1 <i>SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS.</i>	38
3.7.2 <i>SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE SELECCIÓN DE PARTES.</i>	39
3.7.3 <i>SOLUCIÓN A AMBOS PROBLEMAS</i>	39
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>41</b>
4.3.1 <i>ELECTRODOS.</i>	43
4.4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.	45
4.4.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	45
4.4.2 <i>CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN</i>	45
4.4.2.1 <i>MAQUINARIA.</i>	45
4.4.2.3 <i>PERSONAL.</i>	47
4.4.3 <i>PROCESO DE FABRICACIÓN.</i>	47

4.5	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.	50
4.6	DEFINICIÓN CONCEPTUAL DEL PROBLEMA.	52
<b>5.</b>	<b>MODELADO DEL PROBLEMA</b>	<b>54</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.	54
5.2	ENUNCIADO DEL PROBLEMA	54
5.3	DATOS DEL PROBLEMA	55
5.4	MODELO DE SELECCIÓN DE PEDIDOS Y CARGA DE MÁQUINAS	62
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>66</b>
6.1	INTRODUCCIÓN	66
6.2	PLAN DE PRODUCCIÓN REAL SIN RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 0)	66
6.3	SOLUCIÓN DEL MODELO SIN RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 1)	68
6.4	SOLUCIÓN DEL MODELO CON RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 2)	68
6.4.1	<i>SELECCIÓN DE PEDIDOS Y RUTAS</i>	68
6.4.2	<i>CARGA DE MÁQUINAS</i>	69
6.4.3	<i>VIDA ÚTIL DE LAS HERRAMIENTAS</i>	70
6.5	COMPARATIVA SITUACIÓN ACTUAL (UNA RUTA) VS. MODELO (CON RUTAS ALTERNATIVAS)	71
6.5.1	<i>SITUACIÓN ACTUAL.</i>	71
6.5.2	<i>COMPARACIÓN EN LA CARGA DE MÁQUINAS.</i>	73
6.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	74
6.6.1	<i>AUMENTO DE PEDIDOS A FABRICAR</i>	75
6.6.2	<i>Aumento en la demanda del pedido inicial.</i>	77
6.6.3	<i>MODIFICACIÓN DEL VALOR DE ALFA.</i>	79
6.6.4	<i>MODIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE HERRAMIENTAS.</i>	80
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>82</b>
7.1	CONCLUSIONES	82
7.2	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	83
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>84</b>
8.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
<b>ANEXOS</b>		<b>87</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3. 1	Diversos métodos de resolución al problema de selección de pedidos y carga de máquinas.	40
Tabla 5. 1	Número y tipo de herramientas utilizadas	56
Tabla 5. 2	Copias disponibles por cada herramienta	56
Tabla 5. 3	Capacidad de los almacenes de herramientas	56
Tabla 5. 4	Vida útil de las herramientas	57
Tabla 5. 5	Demanda del período	58
Tabla 5. 6	Características de las operaciones de cada pedido	59
Tabla 5. 7	Tiempo disponible por máquina	60
Tabla 5. 8	Tiempos de Set-Up de cada pedido en cada máquina	62
Tabla 6. 1	Carga de las diferentes estaciones (Esc. 0)	67
Tabla 6. 2	Uso de las herramientas (Esc. 0)	68
Tabla 6. 3	Selección de pedidos y proporción de rutas prueba inicial (Esc. 2)	69
Tabla 6. 4	Carga de las diferentes estaciones (Esc. 2)	70
Tabla 6. 5	Uso de las herramientas (Esc. 2)	71
Tabla 6. 6	Producción semanal de Electroodos	72
Tabla 6. 7	Carga de máquinas actual vs. Modelo propuesto	73
Tabla 6. 8	Producción semanal con 22 pedidos disponibles y rutas alternativas	76
Tabla 6. 9	Nuevas Demandas de pedidos (incremento del 17%)	78
Tabla 6. 10	Uso de herramientas con Nuevas Demandas de pedidos (incremento del 17%)	78
Tabla 6. 11	Cantidad de herramientas disponibles (decremento del 20%)	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2. 1 Cómo forma parte la producción de un sistema productivo. (Cuatrecasas, 2000)	17
Figura 2. 2 División del Lead Time de Producción (Bauer, Bowden, Browne, Duggan, & Lyons, 1991)	19
Figura 4. 1 Ejemplo de un Electrodo	43
Figura 4. 2 Ejemplo de otra geometría de Electrodo	44
Figura 4. 3 Ejemplo de la maquinaria utilizada para la producción	46
Figura 4. 4 Configuración del layout actual de la empresa	47
Figura 4. 5 Ejemplo de cómo se reciben las órdenes de compra por parte de los clientes.	48
Figura 4. 6 Ejemplo de formato de órdenes a fabricar	49
Figura 4. 7 Ejemplo de Hoja Viajera que acompaña a cada electrodo a fabricar	49
Figura 4. 8 Diferentes variedades de Electrodo fabricados	51

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 6. 1Carga de máquina actual vs. modelo propuesto	74
Gráfico 6. 2 Carga de máquina 18 pedidos vs. 20 pedidos	76
Gráfico 6. 3 Uso de herramientas 18 pedidos vs. 20 pedidos	77
Gráfico 6. 4Carga de máquinas para demanda extra	79
Gráfico 6. 5 Carga de máquina a distintos valores Alfa	79
Gráfico 6. 6 Uso de herramientas a valores ( $\alpha$ ) distintos	80

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 INTODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha transformado materia prima en productos terminados destinados a satisfacer alguna necesidad. Para ello se ha valido de diversos métodos y técnicas que ha ido perfeccionando a medida que fue evolucionando. Hemos pasado de métodos rudimentales de fabricación, a complejos y sofisticados sistemas, totalmente autónomos y dependientes cada vez en menor medida de la mano del hombre.

La producción es una actividad económica de la empresa, cuyo objetivo es la obtención de uno o más productos o servicios, para satisfacer necesidades de los consumidores, es decir, a quienes pueda interesar la adquisición de dicho bien o servicio.

La producción se lleva a cabo por medio de la ejecución de un conjunto de operaciones integradas en procesos. Cualquier actividad que proporcione un valor, susceptible de cubrir necesidades manifestadas por lo posibles consumidores, se considera actividad productiva, y por tanto justifica la existencia misma de la empresa. La creación de bienes, bien sea por extracción de recursos naturales o por manufactura industrial y la prestación de servicios de todo tipo, serán pues actividades de producción (Cuatrecasas, 2000).

En las últimas décadas, en concreto a partir de la Segunda Guerra Mundial, numerosos métodos han sido desarrollados para resolver el problema de la gestión de la producción y han sido muchos los autores que han dedicado sus esfuerzos en desarrollar modelos que resuelvan problemáticas concretas, muchos de estos estudios han generado otros más que incorporan nuevas variables y mejoran la capacidad de resolución que tiene cada modelo

Sin embargo, a pesar de la gran evolución que han tenido los métodos de fabricación, hoy en día nos seguimos enfrentando a un complejo problema: la planificación y el control de la producción. ¿Cómo transmitimos al piso de fabricación los requisitos del cliente? ¿Cómo organizamos los recursos para cumplir con la demanda? ¿En qué secuencia debo de producir? Estas y otras muchas preguntas surgen día a día en todas las organizaciones, dando lugar al desarrollo de métodos y modelos capaces de responderlas.

Vivimos en un entorno en el cual la demanda de productos es cada vez más cambiante; los consumidores se han vuelto más exigentes con los productos que adquieren, cada vez los desean en menos tiempo, poder personalizarlos a su gusto, adquirirlos a mejores precios y por supuesto, que

cumplan con sus expectativas de calidad. Por ello, los sistemas productivos tienen que evolucionar al mismo ritmo, adoptando medidas que incrementen la eficiencia y la productividad.

Este problema tiene un especial interés en entornos de tipo taller, conocidos en la literatura como (job-shop), puesto que se caracterizan por tener una gestión bastante compleja. El control de la producción en este tipo de entornos tiene un gran margen de mejora puesto que se han desarrollado pocos métodos (en comparación con otros) para ser aplicados.

Una realidad, es que cualquier empresa u organización, ya sea pública o privada, de manufactura, de servicios o del sector terciario debe comenzar por tener un plan. Una guía que les dicte el que se tiene que hacer y cómo se podrá hacerlo.

Las operaciones en la manufactura se han vuelto muy complejas. Esta complejidad hace que sea cada vez más y más difícil para la gerencia predecir el desempeño de sus operaciones de manufactura. En particular, la relación entre los criterios de desempeño como el trabajo en proceso (WIP), los tiempos de entrega, los costos y la inversión de capital se han vuelto muy complicados (Van Vliet & Rinnooy Kan, 1991).

El tiempo de entrega se ha convertido en uno de los requisitos principales de las empresas al momento de elegir a sus proveedores. “Una simple solución al problema de entregar la producción al mercado sería producir la orden de cada cliente inmediatamente y entregarla poco después de que la orden es recibida. Algunos negocios de servicio (como restaurantes) deben operar de esta manera, pero la mayoría de los negocios de manufactura no pueden” (Powell, 1970). Generalmente se establece un plazo en el cual se debe realizar la entrega de la producción, o bien el proveedor estima un plazo de entrega con el cliente, pero, ¿cómo calcular adecuadamente este plazo? Muchas veces las empresas fallan al establecer un período en el cual serán capaces de entregar la producción, ya sea porque estiman erróneamente fechas que no serán capaces de cumplir, o fechas con las que se protegen mucho y terminan por tener maquinaria y personal ocioso.

Como podemos ver, son tantas las variables a controlar, tantos los escenarios y las combinaciones posibles, que este problema no puede tratarse de forma universal, sino que tiene que personalizarse a cada empresa, adoptando aquellas técnicas que mejor se adapten a sus necesidades y personalizándolas o ampliándolas según convenga.

Dentro de las múltiples problemáticas planteadas dentro de la gestión de la producción, en el presente trabajo nos vamos a centrar en la selección de pedidos a fabricar en un determinado horizonte de planificación para un taller tipo “job-shop” y calcular la carga óptima de trabajo en las máquinas del taller cuando existen múltiples rutas alternativas.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es por un lado analizar el estado del arte en cuanto a la selección de pedidos y carga de máquina se refiere, se analizarán algunos de los diferentes métodos y modelos que se han desarrollado para abordar esta problemática así como los diferentes enfoques que se le han dado en entornos generalmente de Job-Shop. Por otro lado la intención de este trabajo es, a partir de los diversos modelos existentes, generar un modelo de programación lineal entera (MILP) para la selección de pedidos y carga de máquinas, incorporando nuevos elementos con el fin de resolver esta misma problemática en un entorno real, y aplicarlo al sistema real para realizar mejoras.

El modelo será adaptado para una empresa de fabricación de componentes para la industria automotriz, Ferroviaria y Metalmecánica, en concreto en el área que fabrica Electroodos. Así mismo, todo lo que se exponga en el Capítulo 4 será con el fin de ilustrar teoría referente al entorno de dicha empresa y su problemática.

Con esto lo que se pretende es mejorar y simplificar la tarea de organizar la producción en el taller de trabajo. Se desarrollará hasta una fase en la cual se pueda determinar la carga de las diferentes estaciones de trabajo así como determinar si es posible realizar todos los pedidos y en caso de que no sea, determinar cuáles de estos puede ser realizado. Se dejarán abiertas futuras líneas de trabajo que permitan llegar a un mayor nivel de detalle en la planificación de la producción.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El contenido de este trabajo está estructurado de la siguiente manera:

- **Capítulo 2- Conceptos sobre la planificación de la producción.** En este capítulo se abordará brevemente la teoría referente a la planificación de la producción de una empresa. Se hará de forma muy concisa y referente a cuestiones propias de la empresa que se estudia.
- **Capítulo 3- Estado del arte.** En este capítulo se expondrán diversos estudios que se han realizado por parte de investigadores sobre el tema en estudio; revisaremos por separado los conceptos de carga de máquinas y selección de pedidos y posteriormente de manera conjunta en entornos de Sistemas de Fabricación Flexible. Se expondrán las soluciones encontradas a esta problemática así como las diversas heurísticas, metaheurísticas y métodos de Programación Lineal utilizados para solución.

- **Capítulo 4- Descripción del problema.** se realizará una introducción a la empresa sobre la cual se basa el estudio; se expondrá su historia, a qué se dedica, la productos que fabrica y la manera actual como realiza la programación y el control de la producción; también enunciaremos cuál es la problemática actual a la que se enfrenta la empresa y que ha originado el desarrollo de este trabajo.
- **Capítulo 5- Desarrollo del modelo.** En este capítulo se expone primeramente los datos de partida del modelo. Posteriormente se verá el modelo de Programación Lineal Mixta Entera desarrollado para la selección de pedidos y carga de máquinas.
- **Capítulo 6- Resultados.** En este capítulo se verán los resultados obtenidos de varios escenarios propuestos. El escenario de partida muestra la situación actual con una sola ruta por pedido. Los escenarios propuestos añaden rutas alternativas y pedidos adicionales. También se plantea análisis de sensibilidad sobre varios parámetros del modelo. Para cada escenario se realiza una interpretación de los resultados y comparativas con otros escenarios.
- **Capítulo 7- Conclusiones.** En este capítulo se exponen las conclusiones de este trabajo así como líneas futuras de investigación.
- **Capítulo 8- Bibliografía.**

# 2. LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCIÓN

---

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en el capítulo anterior, la organización y el control de la producción representan uno de los mayores retos de una empresa. Sin embargo, para que se pueda realizar de manera eficiente tenemos que partir de una planificación. El concepto de planificación de la producción ha sido abordado por numerosos autores a lo largo de los años y numerosos métodos han sido propuestos para su realización, algunos de ellos aplicables a cualquier entorno, mientras que otros han sido desarrollados para entornos específicos.

En este capítulo se va a hacer una revisión conceptual de la función de producción en la empresa, de la que forma parte la problemática que se aborda en el presente trabajo: la selección de pedido y carga de máquinas en centros de trabajo tipo taller “job-shop”.

## 2.2 LA PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA.

Antes de poder hablar de lo que es la planificación de la producción, tenemos que entender qué es en sí la producción y qué es lo que representa para una empresa. La producción es una “actividad económica de la empresa, cuyo objetivo es la obtención de uno o más productos o servicios (según el tipo de empresa y su producción), para satisfacer las necesidades de consumidores, es decir, a quienes pueda interesar la adquisición de dicho bien o servicio (Cuatrecasas, 2000).

La producción se lleva a cabo por medio de la ejecución de un conjunto de *operaciones* integradas en *procesos*. Por este motivo la dirección de la producción se la denomina en muchas ocasiones, dirección de operaciones; es corriente referirse a las operaciones como a la actividad propia de la producción.

Dado que en la producción pueden obtenerse bienes o servicios, la actividad de la empresa no se trata exclusivamente de una producción técnica en la que se fabrica un bien físico, sino que la producción es, básicamente, una actividad económica. Cualquier actividad que proporcione un valor, susceptible de cubrir necesidades manifestadas por los posibles consumidores se considera una actividad de



producir y por lo tanto justifica la existencia de la propia empresa.

La producción se lleva a cabo en un sistema productivo, el cual se ilustra en la Figura 2.1 desarrollada por (Cuatrecasas, 2000):



Figura 2. 1 Cómo forma parte la producción de un sistema productivo. (Cuatrecasas, 2000)

En relación a sus líneas de productos, las empresas pueden seguir diversas estrategias, en el bien entendido que no todas están al alcance de cualquier organización.

Según (Companys & Corominas, 1993) existen diferentes estrategias de producción que una empresa puede seguir, de la cual podemos destacar la siguiente, para la empresa objeto de este estudio:

- *Producción eficiente.* El esfuerzo se centra en la producción. Esta estrategia se basa en la eficiencia y la flexibilidad de la producción y el control de los costes, para competir en precios y plazos de entrega. Puede ser adecuada para organizaciones pequeñas.

La tarea del entorno de producción debe ser considerada como una selección de técnicas que soportan al personal de producción en mantener un sistema basado en productos dentro de su sistema de producción. Existen tres procedimientos que se identifican como de importancia significativa en la organización de un sistema de producción basado en el producto (Bauer, Bowden, Browne, Duggan, & Lyons, 1991):

- Manufactura basada en producto
- Análisis del sistema de manufactura.
- Planificación del proceso de producción

### **2.2.1 MANUFACTURA BASADA EN EL PRODUCTO.**

La manufactura basada en el producto se puede describir como un enfoque organizacional para fabricar productos con requisitos de procesamiento similares dentro de grupos de recursos conocidos como centros de trabajo. Un Layout basado en el proceso agrupa a los diferentes recursos en grupos de acuerdo con su función, por ejemplo todos los Tornos o todas las Fresadoras están ubicados en un departamento. En un Layout basado en producto todos los recursos están requeridos para la fabricación de una familia de productos están agrupados en uno o más centros de trabajo. El cambio a un Layout basado en el producto puede conllevar a una mayor organización del Layout (Bauer, Bowden, Browne, Duggan, & Lyons, 1991).

Existen cuatro grandes ventajas que se pueden observar de un Layout basado en el producto (Burbidge, 1989):

- I. Una reducción en el tiempo de procesamiento;
- II. Una reducción en la complejidad de la delegación de tareas;
- III. Un incremento de las habilidades de los operarios y supervisores;
- IV. Provee una buena base para desarrollar la automatización.

Al disminuir los tiempos de procesamiento, los niveles de stock de trabajo en proceso (WIP) y los costos de almacenaje disminuyen igualmente. Debido que el tiempo de procesamiento es un componente del tiempo total que toma el poner un producto en el mercado, un incremento de ventas podría resultar de la introducción de nuevos productos especialmente de aquellos en ambiente de “make to order”.

### **2.2.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MANUFACTURA.**

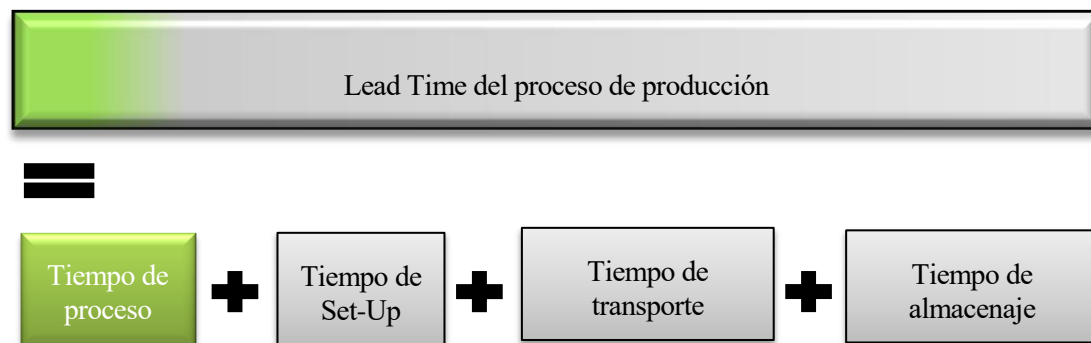
El propósito principal del procedimiento de análisis de fabricación dentro del diseño de tareas en un ambiente de producción es el proveer un diagnóstico para problemas de producción, con miras a optimizar la eficiencia del sistema de producción. Diversos problemas de producción, tales como tiempo de Set-Up muy altos, niveles grandes de trabajo en proceso (WIP) y una mala calidad en los productos claramente reducen algunos de los beneficios de la manufactura basada en producto. (Bauer, Bowden, Browne, Duggan, & Lyons, 1991)

Hoy en día existen nuevos enfoques en la administración de la producción como el Justo a Tiempo

(JIT <sup>1</sup> por sus siglas en inglés), son más comprensivas que los enfoques tradicionales, debido a que el JIT incluye el análisis del rango de productos y procesos dentro del sistema de manufactura con vistas hacia continuamente mejorar la tecnología existente, junto con la opción de utilizar nueva tecnología.

Un análisis del Lead Time<sup>2</sup> de un rango de productos sirve como un buen indicador del desempeño de un sistema de fabricación. Si se dividen los distintos elementos de un sistema de producción en pequeños Lead Time dentro de uno más grande, podemos claramente descubrir que únicamente alrededor de un 5% del tiempo total corresponde a actividades de procesamiento del producto. En la Figura 2.2 se puede observar esta división.

El énfasis en la mejora continua de la eficiencia del sistema de producción incluye el examinar los



**Figura 2. 2 División del Lead Time de Producción (Bauer, Bowden, Browne, Duggan, & Lyons, 1991)**

diferentes elementos del Lead Time productivo y buscar la eliminación de cualquier despilfarro en cualquiera de los elementos del tiempo.

## 2.3 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.

La planificación de la producción contempla muchos aspectos, que no se centran únicamente en la transformación de requisitos de producción en una serie de tareas a pie de fábrica para su elaboración. La planificación va desde la elaboración del plan maestro de producción hasta incluso la secuenciación de tareas en los diferentes centros de trabajo. De igual forma, dependiendo de lo que se planifique intervendrán diferentes personas dentro de la organización con un nivel jerárquico distinto. En este apartado revisaremos algunos conceptos que involucran a la planificación, así

<sup>1</sup> JIT- Just in Time: Metodología desarrollada por Toyota que significa hacer "solo necesario, cuando se necesita y en la cantidad que se necesita". (Toyota, 2015)

<sup>2</sup> Lead Time: Tiempo que transcurre entre que un cliente coloca un pedido hasta que este es entregado. Puede también entenderse como el tiempo que transcurre entre el inicio y el fin de una actividad.

mismo veremos cómo una vez que se ha planificado, se pasa a la programación de la producción, explicaremos en qué consiste dicha programación así como todo el entorno que envuelve a la programación de la producción. Por último hablaremos del concepto del Job Shop, que nos servirá para ilustrar el tipo de configuración productiva que tiene la empresa objeto de este estudio. La idea detrás de esta breve introducción al concepto de la planificación de la producción es sentar las bases del estudio, ya que posteriormente hablaremos del estado del arte sobre diferentes teorías de programación de la producción hasta llegar a la que será utilizada para la resolución de nuestra problemática.

### 2.3.1 EL CONCEPTO DE PLANIFICACIÓN.

En la literatura diversos autores abordan la necesidad de elaborar planes para la consecución de los objetivos de la empresa. Algunos como (Chase & Aquilano, 1994) la denominan como *Planificación Agregada*, lo cual significa el traducir los planes anuales y trimestrales a grandes categorías de trabajo y producción y lo cuales no especifican detalles de lo que se realizará, sino que lo agrupan. Por ejemplo decir: “La cantidad de trabajadores que requiere la planta Automotriz” en vez de decir “la cantidad de trabajadores que se requieren para la elaboración de los motores”.

La empresa entonces, debe planificar sus actividades de producción en distintos niveles pero operar todo como un sistema. Por regla general, la planificación de la producción se encuentra dividida en tres horizontes temporales, que dependiendo del sector del que se hable, o del autor que lo describa, puede variar el tiempo que se asigna a cada uno, sin embargo utilizaremos los propuestos por (Chase & Aquilano, 1994).

- I. *Largo Plazo*. Comienza con una declaración de los objetivos de la organización y las metas para los diez años siguientes. A esta se le conoce también como planificación estratégica, en la que se establecen los objetivos y las estrategias, y en general, los planes globales a largo plazo, normalmente entre tres y cinco años.<sup>3</sup> Esta estrategia establece cómo alcanzar estos objetivos y metas de acuerdo con las capacidades de la compañía y el entorno político y económico. Los elementos del plan estratégico incluyen delinear las líneas de productos, los niveles de calidad y precio y las metas. Todo esto para traducirse en objetivos individuales de mercado y las líneas de productos y plan de producción a largo plazo.
- II. *Medio Plazo*. La planificación a medio plazo por lo general cubre un periodo de 6 a 18 meses y se corresponde con la “planificación táctica”, con incrementos de tiempo mensuales o

---

<sup>3</sup> Este horizonte de planificación varía con diferentes autores, este en concreto se toma de (Domínguez Machuca, 1995)

trimestrales. En este periodo incluimos la planificación agregada de la producción en donde los requisitos se especifican por grupos de productos principales, ya sea en horas de trabajo necesarias o en unidades de producción por periodos mensuales, hasta 18 meses en el futuro. Incluye también el programa maestro de producción (MPS) que genera las cantidades y fechas para la fabricación de productos específicos.

- III. *Corto Plazo*. El término de corto plazo es el más flexible en lo que respecta al tiempo considerado como horizonte, ya que, al desarrollar en detalle el plan de producción, su ámbito se solapa continuamente con la planificación a medio plazo. El corto plazo se corresponde con las “decisiones operativas” (De la Peña Esteban, 2011). Abarca un periodo de un día a seis meses, generalmente con incrementos de tiempo semanales, algunos autores como (Domínguez Machuca, 1995) identificación dentro del corto plazo a la Planificación Operativa, donde se concretan los planes estratégicos y los objetivos globales de la empresa para cada una de las áreas y subáreas funcionales, llegándose a un elevado grado de detalle. En este punto se puede elaborar el Plan Agregado de Producción en donde tenemos que tener en cuenta, las cantidades anuales de los productos a elaborar para descomponerlas en unidades de tiempo más pequeñas, ya que al desagregarlas de esta manera obtendremos el programa maestro de producción.

Autores como (Van Vliet & Rinnooy Kan, 1991) identifican un par de problemas que emergen en el mediano a largo plazo al diseñar redes de manufactura que involucran decisiones estratégicas a un nivel gerencial:

- I. El primer problema es respecto al diseño de la red de manufactura de modo que satisfaga un cierto nivel de desempeño (por ejemplo el WIP, tiempo de entrega). Los costos asociados con el diseño deberán ser tan pequeños como sea posible.
- II. El segundo problema tiene que ver con la cantidad de maquinaria que tiene que ser distribuida a lo largo de la red. Aquí el punto es optimizar (en términos de desempeño de la red) el uso de la maquinaria.

De acuerdo con (Cuatrecasas, 2000) la planificación e implementación de la producción en un sistema productivo se divide en 9 etapas, que explican de manera muy clara el proceso:

- 1) Previsión de la demanda.
- 2) Planificación de la capacidad
- 3) Diseño de procesos y distribución en planta
- 4) Implantación de los procesos de acuerdo con los métodos de trabajo más eficaces.
- 5) Planificación de la producción.

- 6) Gestión de materiales y existencias.
- 7) Programación y control de existencias
- 8) Integración de las actividades de suministro de materiales de producción.
- 9) Gestión y control de la calidad.

### **2.3.2 PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD.**

La planificación de la capacidad productiva no exige el uso de conocimientos ni instrumentos específicos, sino la integración de muy diversos saberes (mercados, previsión y previsión tecnológica, tecnología, gestión de la producción, etc). Aún en el caso de grandes sistemas productivos, a cuya planificación se dedica gran esfuerzo y gran cantidad de recursos, pueden producirse y de hecho se producen errores importantes, a veces de consecuencias muy graves, dada la dificultad, si no la imposibilidad, de prever el futuro; las hipótesis que parecen más sólidas en un momento dado son muchas veces desmentidas por la realidad, especialmente cuando el plazo de maduración de los proyectos es largo. (Companys & Corominas, 1993)

La capacidad productiva se puede expresar a través de la máxima tasa posible de producción de bienes o servicios o de la cantidad máxima disponible de recursos en un instante o en una unidad de tiempo, según los casos (Companys & Corominas, 1993). Cuando todos los productos son muy similares se puede utilizar la primera definición y, si no, la segunda (cuándo los productos son heterogéneos, la cantidad de los mismos se puede obtener es función de la composición de us “mezcla” –mix-, la cual determina asimismo qué recurso o recursos constituyen los cuellos de botella del sistema productivo.

Hay que tener en cuenta al hacer cálculos de capacidad, las averías y los programas de mantenimiento, así como las variaciones estacionales de la demanda que no pueden ser absorbidas a través de los stocks ni con las variaciones en los ritmos de trabajo. Por supuesto, una decisión muy importante es la de “hacer o comprar”, que hay que tomar para cada elemento (sea bien o servicio) que interviene en el proceso productivo.

### **2.3.3 PLANIFICACIÓN CONTRA PEDIDO.**

Dentro de la industria podemos identificar diferentes tipos de empresas cuya planificación se orienta dependiendo del tipo de cliente al que sirven; pero de manera general las empresas planifican contra un pedido específico puesto que tienen que servir y cubrir las necesidades de sus cliente. En las

empresas que fabrican contra pedido (Santos García, 2007) la tarea de determinar la secuencia óptima de fabricación de artículos en un taller es complicada debido al carácter combinatorio del problema. Sólo unos pocos casos se pueden resolver de forma exacta.

No obstante, es preciso no sólo planificar, sino controlar lo que se ha planificado comprobando que se está realizando según lo establecido. Todas las empresas, sean del tipo que sean, necesitan saber qué productos se van a fabricar cada día, y hacerlo de la forma más eficiente es el objetivo principal del planificado.

La definición de las prioridades de los artículos que van a procesarse debe seguir algún criterio de optimización, como el coste, el tiempo de cambio, o la importancia de los clientes.

La planificación detallada tiene como objetivo principal decidir la secuencia de trabajos que realizará cada recurso de la empresa en el horizonte de planificación más pequeño posible.

Además, la programación tiene otros objetivos:

- Cumplir las fechas de entrega.
- Minimizar el tiempo y el coste de fabricación.
- Minimizar el WIP.
- Maximizar la utilización de los recursos.
- Minimizar los plazos de entrega.

Paradójicamente, cuanto mayor es el número de limitaciones en los procesos de la empresa más fácil resulta planificar la producción. Sin embargo, la programación propuesta no será, en ningún caso, eficiente. La principal consecuencia de la programación de la producción es la posibilidad de descubrir los puntos débiles de la planta. Por tanto, se puede considerar la programación como una fuente de proyectos de mejora, tratando de eliminar restricciones que “dificultan” la definición de la secuencia.

En ocasiones, es preciso dar una fecha de entrega al cliente cuando realiza el pedido. Una fecha demasiado tardía o demasiado optimista puede estropear, en algunos casos, las relaciones con el cliente o conducir a sanciones. El cálculo de la secuencia óptima de los trabajos en el taller es muy complejo y sólo se ha resuelto para casos muy sencillos (una máquina o, a lo sumo, dos).

Para efectos de planificación, debemos de estar interesados no solo en las salidas, sino también en las entradas al proceso de fabricación (Powell, 1970).

El tiempo de ciclo de fabricación es el tiempo promedio necesario para una orden típica para que pase a través del estado de trabajo en proceso, el tiempo medio transcurrido entre la fecha en la que

se liberó la orden a planta y la fecha en la que esta se envía (al almacén de PT).

El tiempo ciclo de fabricación puede ser dividido en tres componentes:

- I. Tiempo de producción real, cuando se realizan operaciones que transforman la materia prima.
- II. Tiempo de espera, tiempo en que las piezas esperan antes o tras ser procesadas.
- III. Tiempo de transporte, cuando son movidas de un lugar a otro.

Cuando se requiere hacer promesas de entrega a un cliente y cuando se planea la compra de componentes especiales o materia prima, es necesario tener en cuenta no solo el tiempo ciclo de fabricación, sino también cualquier atraso de órdenes que no han sido liberadas a planta.

### **2.3.4 MAKE TO ORDER.**

Haremos referencia a este sistema de producción, puesto que como se verá más adelante, es el sistema de producción que se sigue por parte de la empresa que se estudiará más adelante.

El make to order, conocido por sus siglas en Inglés (MTO) es un proceso de manufactura en el cual la fabricación se inicia una vez que la orden de un cliente es recibida. Formas del MTO pueden variar, por ejemplo, un proceso de ensamble inicia cuando la demanda ocurre o la fabricación se inicia con el desarrollo de la planificación.

Fabricar después de haber recibido una orden del cliente significa empezar un operación en la cadena de suministro de tipo PULL (tirar), porque la producción se desarrolla una vez que la demanda es confirmada. Los modelos de negocio opuestos es la fabricación de productos para almacenarlos (MTS- Make to Stock) la cual es una producción de tipo PUSH (empujar).

Existen varios modelos del MTO. Por ejemplo, en algunos casos, el proceso de ensamblaje de partes preparadas comienza cuando la demanda actual sucede. O, en otros casos, el proceso de producción comienza con la obtención de materiales y partes (Asprova Corporation, 1994).

## **2.4 PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN**

La programación de la producción es un proceso de toma de decisiones que desempeña un papel crucial en la fabricación así como en los sistemas de servicios e industrias. En el actual entorno competitivo, rápidamente cambiante, una programación efectiva se ha convertido en una necesidad para la supervivencia en el mercado. Las empresas tienen que cumplir con los plazos de producción



y fechas de entrega comprometidos con los clientes y el no hacerlo puede derivar en una pérdida económica significativa y de confianza del cliente (Fanjul Peyró, 2010).

En términos generales, la programación de la producción se refiere a la asignación de unos recursos, generalmente limitados, a unas tareas, durante un tiempo de acuerdo con los métodos más adecuados. Es un proceso de toma de decisiones cuyo objetivo es la optimización de uno o más objetivos sometidos a limitaciones o restricciones de toda índole, buscando que se obtenga el producto con la máxima productividad y calidad al mínimo tiempo y coste.

El proceso de planificación y control de la producción se puede reflejar en tres etapas (Eguía Salinas, 1996):

- I. *Planificación*, se determina el plan maestro de producción, que consiste en el cálculo de la cantidades y fechas en las que deben estar disponibles los inventarios de distribución.
- II. *Cálculo* del programa detallado de fabricación y aprovisionamiento, y de las cargas de trabajo en las secciones, a partir del plan maestro.
- III. *Control* y seguimiento de las operaciones de taller y de los proveedores para cumplir el programa detallado.

De acuerdo con la tipología y volumen de materiales y productos, la producción y sus procesos pueden adoptar distintos tipos de implantación. Existen tres tipos de estructuras de producto y materiales que lo componen, muy utilizadas en la actualidad para orientar acerca del tipo de implantación más adecuado para los correspondientes procesos productivos.

#### **2.4.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN.**

Según (Powell, 1970) para poder desarrollar un plan o un programa es necesario conocer explícitamente los requisitos de producción. Para ello se tienen que tener en cuenta 4 características principales:

- I. La primera es una medida de la capacidad disponible de la planta. Esta capacidad puede ser descompuesta en sub-partes más pequeñas tales como máquinas, departamentos o personas.
- II. La segunda, tiene que existir una manera de medir la cantidad de capacidad que se necesita para poder producir el trabajo requerido. Si la planta solo produce un tipo de producto este requisito es relativamente fácil de completar, pero cuando se trata de una mezcla de

productos diferentes (como en la gran mayoría de los casos) será necesarios describir el tipo y la cantidad necesaria de capacidad para cada producto.

- III. El tercer requisito es un método sistemático para colocar la capacidad disponible a las órdenes de producción que serán programadas. El método puede consistir en una simple regla: lo primero que entra, es lo primero que sale; cada trabajo será programado en el orden conforme se vayan recibiendo. Alternativamente, se pueden observar ciertas prioridades, como órdenes de producción antes que órdenes de stock, u órdenes de reparación antes que órdenes de ensamblaje. Cada período de producción deberá ser tan pequeño como una división de tiempo de un día, una semana o un mes. En el corto plazo la capacidad total disponible de cada período de producción es una cantidad fija que debe satisfacer cualquier demanda que se le plantee.
- IV. La cuarta característica principal de un sistema de programación son las provisiones para un método y un ciclo de reprogramación. Principalmente, esta característica se requiere porque algunas órdenes se retrasan. Por definición, el tiempo dedicado para realizar las operaciones requeridas en cualquier orden retrasada ya es pasado; pero las operaciones no han sido realizadas.

#### **2.4.2 SELECCIÓN Y DISEÑO DE PROCESO.**

La planificación y diseño de los productos, tiene importantes repercusiones sobre la planificación y diseño del proceso y sobre las necesidades de capacidad.

Las configuraciones productivas que pueden adoptarse en la industria han sido clasificadas de múltiples maneras por distintos autores. En función de la continuidad de la obtención del producto existen 3 clasificaciones (Domínguez Machuca, 1995):

- I. *Por proyectos*, cuando se obtienen uno o pocos productos con un largo período de fabricación.
- II. *Por lotes*, cuando se obtienen productos diferentes en las mismas instalaciones.
- III. *Continua*, cuando se obtiene siempre el mismo producto en la misma instalación.

Sin embargo, la configuración por lotes se puede presentar en 3 formas diferenciadas, lo que origina la clasificación propuesta por (Hayes y Wheelwright, 1984), que distingue entre las categorías de proyecto, talleres o a medida, en batch, en línea y continua.

### **2.4.3 PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA: SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS).**

Pueden implantarse sistemas de producción completamente automatizados, integrados por células flexibles o equipos específicos cuya programación, ejecución de operaciones, transferencia de materiales y control, están gobernados por un ordenador central que permite enlazar todos los equipos de la planta. Puede llevar a cabo los procesos que correspondan y que pueden ir desde los propios de productos concretos, con máquinas dedicadas hasta los correspondientes a una determinada variedad de productos, con máquinas de propósito general, todo ello de forma que tanto unas como otras puedan prepararse con rapidez; el sistema FMS gobierna asimismo las operaciones de cada máquina y sus ciclos, de forma que se alcance la sincronización y controla las cargas, transferencias y descargas de materiales de las máquinas de forma automática.

#### **2.4.3.1 MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).**

Hoy en día la gran mayoría de empresas manufactureras cuentan con equipos de producción CNC (Control Numérico Computarizado) que incorporan sistemas CAD (Computer Aided Design) de diseño asistido por computadora (Companys & Corominas, 1993). Un sistema CAD permite, como ha enunciado (Ferré Macip, 1988):

1. Construir, manipular y visualizar modelos geométricos del producto en 2 ó 3 dimensiones, según se precise tanto a nivel de conjunto como de detalle de cada una de sus partes.
2. Estudiar y analizar problemas geométricos de interferencias, juegos, estudio de espacios, visibilidad, etc.; problemas cinemáticos de barridos, velocidades y aceleraciones; problemas dinámicos de cálculo estructural, fatiga, transmisión de calor, circulación de fluidos, simulación de circuitos; y en general todo tipo de cálculos y simulación.
3. Recoger, analizar y reducir los datos de las magnitudes que actúan sobre el producto.
4. Obtener toda la documentación técnica necesaria, es decir: dibujar los planos de esquemas, conjuntos y despieces; obtener listas de composición del producto etc.

Gestionar todos los datos del producto y del proyecto a partir de una base de datos de planos estándares, normas, resultados de pruebas que permita una buena estandarización del producto y normalización de los ensayos.

### **2.4.4 CUMPLIMIENTO DE LAS ENTREGAS.**

Se incluye este apartado sobre el cumplimiento de las entregas puesto que la planificación y el

control de la producción están orientados a cumplir las entregas. Se podrá lograr una configuración productiva óptima, tener la mejor calidad en el producto, el mejor diseño de planta; pero si no se consigue cumplir en tiempo y forma con la entrega de la producción que el cliente espera, se corre el grandísimo riesgo de perderlo. Esto se agrava cuanto más abajo se encuentra una empresa en la cadena productiva, puesto que un retraso o incumplimiento en la fecha de entrega afectará al resto de los eslabones.

De acuerdo con (Dominguez Machuca, Álvarez, Domínguez, García, & Ruiz, 1998) este objetivo suele comprender básicamente dos aspectos, que configuran la denominada competencia basada en el tiempo (*time based competition*): “entregas rápidas” y “entregas en fecha”. De acuerdo con ello se trataría de lograr:

- I. El menor tiempo de entrega posible, siendo éste el intervalo de tiempo que transcurre entre el momento en que se recibe un pedido y el instante de su llegada al cliente.
- II. Entregar en la fecha comprometida con el cliente el mayor número de pedidos que sea posible, que suele medirse en función del nivel de servicio.

El primero de los aspectos se refiere a la duración del tiempo de suministro, mientras que el segundo se refiere a la posible variabilidad del mismo. Si distinguimos entre tiempo de suministro planificado y tiempo de suministro real, el primero de los aspectos mencionados pretende que este último sea el menor posible, mientras que el segundo va dirigido al cumplimiento del tiempo de suministro planificado, que en la situación ideal, debería igualarse al real.

Se mencionan dos aspectos que son claves de cara al objetivo de entregas a tiempo, pero no solo dichos aspectos serán necesarios para considerar que se ha cumplido dicho objetivo, puesto que como se ha mencionado antes, la calidad y el servicio son otros objetivos que se han de cumplir de cara al cliente y que de no ser así, aun habiendo cumplido con las entregas en tiempo podría peligrar (Garvin D. , 1994) menciona otros factores que deben ser considerados:

- I. Exactitud, o coincidencia entre la cantidad entregada y la solicitada por el cliente.
- II. Accesibilidad de la información sobre el pedido, que deberá estar disponible en tiempo real.
- III. Calidad correcta del producto al llegar a su destino.
- IV. Facilidad de pedido, de forma que el cliente tenga la mayor comodidad posible para su realización.
- V. Flexibilidad de los pedidos, intentando mejorar la libertad del cliente para elegirlos.
- VI. Facilidad de devolución, o voluntad de la empresa para asumir el costo de devolución del producto.

## 2.5 EL CONCEPTO DEL JOB SHOP.

Hemos visto que la producción consiste en cualquier actividad que transforma una serie de recursos en productos o servicios que satisfacen necesidades. En el caso concreto de obtención de productos es necesario que exista un lugar físico en el cual convergen materiales, personas y maquinaria a través de una serie de procesos y operaciones transforman las materias primas.

Según la manera en la que se realizan las operaciones en las máquinas, podemos identificar tres tipos de sistemas (Pinedo, 1995):

- I. *Flow Shop*: Existen  $m$  máquinas en serie. Cada trabajo debe ser procesado por cada una de las  $m$  máquinas. Todos los trabajos tienen la misma ruta, es decir, primero se procesan en la máquina 1, luego la 2, etc. Después de ser completado en una máquina, el trabajo se une a la cola de la siguiente máquina.
- II. *Job Shop*: Existen  $m$  máquinas. Cada trabajo debe ser procesado por algunas de las  $m$  máquinas (o todas). Cada uno de los trabajos tiene una ruta conocida. Después de ser completado en una máquina, el trabajo se une a la cola de la siguiente máquina de su ruta.
- III. *Open Shop*: Existen  $m$  máquinas. Cada trabajo debe ser procesado por cada una de las  $m$  máquinas. Sin embargo, algunos de estos tiempos de proceso serán cero. No existen restricciones de las rutas que sigue cada producto en el entorno de las máquinas. El programador puede determinar la ruta de cada trabajo y diferentes trabajos pueden tener diferentes rutas.

En la configuración de tipo Job- Shop, (Domínguez Machuca, 1995) se producen lotes más o menos pequeños de una amplia variedad de productos de poca o nula estandarización, empleándose equipos de escasa especialización, los cuales suelen agruparse en talleres o centros de trabajo a partir de la función que desarrollan; estos equipos suelen ser versátiles y permiten ejecutar operaciones diversas, por lo que puede alcanzarse una amplia variedad de outputs. Los costes variables son, en general, relativamente altos debido a la baja o muy baja automatización.

La adecuada gestión de los centros de trabajo está condicionada por una buena estimación de la demanda. La planificación se inicia en el nivel agregado en el que se agrupan todos los tipos de trabajo que se han de desarrollar en un determinado período de tiempo y concluirá con la programación de operaciones, en la que en caso de existir rutas alternativas para los ítems a obtener, se comenzará por realizar la carga de talleres o asignación de cargas a máquinas. Hecho esto se

procederá a la secuenciación, en la que se establecerá la prioridad de paso de los pedidos en los centros de trabajo.

Los Centros de Trabajo producen volúmenes bajos o muy bajos de outputs diversos, elaborados a partir de distintos materiales y con el uso de distintas herramientas. Dado que en la planta se podrán estar fabricando en un mismo momento diferentes tareas para diferentes tamaños de lote de distintos ítems, todos ellos en diferentes etapas de su proceso, hace difícil utilizar un calendario fijo para la utilización del equipo, por lo que la programación de la producción se vuelve indispensable. La gestión de la información es esencial, los cuellos de botella deben reducirse a un mínimo mediante el control de las colas de espera y una adecuada programación y control a muy corto plazo.

## **2.6 CARGA DE MÁQUINAS.**

La programación de asignación de cargas (PAC) consiste en acoplar a corto plazo (desde pocas horas hasta una semana) las órdenes de producción con las cargas de trabajo existentes en los departamentos.

Una carga se refiere a la asignación de tareas a centros de trabajo específicos, máquinas o personas. Las tareas llegan a estar programadas cuando se especifica los tiempos de iniciación y de terminación. Un centro de trabajo (CT) es el área de una empresa en la cual los recursos productivos se organizan y el trabajo se lleva a cabo.

El CT puede ser una máquina, un grupo de máquinas o un área en donde se realiza un tipo de trabajo específico.

La "carga infinita" se presenta cuando la tarea es asignada a un CT sin considerar restricciones sobre la capacidad de los factores de producción (personal, máquinas y otros) y sobre la secuencia real de la tarea. Es utilizado por las grandes empresas con recursos económicos elevados.

La "carga finita" consiste en programar realmente en detalle cada recurso utilizando el tiempo de preparación y de funcionamiento requerido para cada pedido. No se programan más tareas que las correspondientes a su capacidad. Es utilizado por pequeñas y medianas empresas.

# 3. CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PEDIDOS: ESTADO DEL ARTE

---

## 3.1 INTRODUCCIÓN.

Como vimos tanto en la introducción como en el capítulo 2, este trabajo hablará sobre la carga/asignación balanceada de trabajo a máquinas así como la selección de los pedidos o productos a fabricar en un entorno de fabricación de tipo Job Shop. Realizaremos este análisis por dos vías, primero haremos una revisión de la literatura sobre el problema de la carga de máquinas y selección de pedidos. Después revisaremos la literatura referente a la solución de ambos problemas dentro de los SFF, algunos de los diferentes métodos utilizados para resolverlos.

## 3.2 EL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS (MACHINE LOADING PROBLEM).

Dentro de la literatura al problema de carga de máquina suele denominarse como *Machine Loading Problem*; es uno de los problemas más vitales de la planeación de la producción y se refiere a la asignación de las operaciones y herramientas necesarias entre diferentes máquinas de una manera óptima. Este problema es de naturaleza combinatoria y suele ser NP-completo (Mahapatra & Biswas, 2007).

Puede definirse el problema de carga de máquinas como: “... *dada una serie de partes a ser fabricadas, una serie de herramientas necesarias para procesar las partes en una serie de máquinas y utilizando un conjunto de recursos tales como sistemas de manejo de material, pallets y accesorio; como deben asignarse dichas partes y colocarse las herramientas, de modo que la productividad sea optimizada*” (Stecke K. , 1983).

El problema de carga de máquina en la manufactura se ocupa de la selección de un subgrupo de trabajos de una serie de trabajos que deben ser producidos y asignarle sus operaciones a las máquinas necesarias dentro de un horizonte de planeación, consiste en determinar la mezcla de rutas y la asignación de herramientas; por ejemplo, determinar qué proporción de cada pedido deberá ser asignado a cada ruta alternativa y cuantas herramientas de cada tipo se deben asignar a cada máquina en cada grupo de máquinas (Guerrero, 1999). Las restricciones pueden ser clasificadas en dos categorías: restricciones de capacidad y restricciones tecnológicas, de manera que se alcancen ciertas

medidas de desempeño, como por ejemplo la minimización del desequilibrio del sistema o la maximización de la salida. (Kumar & Chandrashekhra, 2012). La primera categoría incluye las capacidades del almacén de herramientas, el número limitado de herramientas de cada tipo que están disponibles y el límite en el tiempo de procesamiento que resulta de tener herramientas con una vida útil finita. Las restricciones tecnológicas incluyen los datos de fabricación de los productos, las rutas, las máquinas y herramientas.

El desequilibrio del sistema se puede definir como la suma de tiempos sobre y sub utilizados en todas las máquinas disponibles en el sistema productivo. Minimizar el desequilibrio también podemos entenderlo como maximizar el uso de la maquinaria. (Mahapatra & Biswas, 2007).

El tiempo de procesamiento y los espacios de herramienta requeridos para cada operación del trabajo así como el tamaño del lote (cuando este exista) se conocen de antemano, ya que serán necesarios para plantear un modelo.

El problema de la carga de maquinaria ha sido también abordado desde la perspectiva de un sistema de fabricación celular; (S, Lozano, Guerrero, Eguía, & Onieva, 1999) identifican este problema para el desarrollo de un sistema celular en presencia de rutas de fabricación alternativas. Las rutas alternativas surgen de dos fuentes: puede haber múltiples planes de proceso para cada tipo de pieza y, de forma independiente, puede haber múltiples máquinas de cada tipo. La existencia de procesos de múltiples planes para cada tipo de parte da lugar al concepto de tecnología de grupo generalizada (GGT por sus siglas en Inglés) (Kusiak 1987).

La carga celular consiste en determinar la cantidad de cada tipo de pieza que seguirá cada ruta de fabricación en un periodo determinado. La diferencia entre el plan de proceso y la ruta de fabricación, es que un plan de proceso es una secuencia de operaciones, cada uno a ser realizado en un tipo de máquina específico; mientras que una ruta específica de fabricación es la máquina individual en la que la operación se va a realizar. Por lo tanto, un plan de un solo proceso puede dar lugar a múltiples rutas de fabricación en caso de que haya varias copias de cada tipo de máquina. (S, Lozano, Guerrero, Eguía, & Onieva, 1999). Los objetivos básicos de esta fase son los de minimizar el flujo intercelular como el balanceo del uso de la máquina y las células. Como podemos ver, estos objetivos son muy similares a los vistos anteriormente.

### **3.3 SELECCIÓN DE PRODUCTOS (PART TYPE SELECTION).**

Los problemas de selección de tipo de pieza se encargan de la selección de una serie de tipos de piezas, en este caso productos, que deberán ser producidos inmediatamente de un número de tipos de



partes dado que existen diferentes fechas de entrega, un número limitado de máquinas, capacidad limitada del almacén de herramientas de cada máquina y un número limitado de cada tipo de herramientas necesarias. (Stecke K. , 1985).

La selección de productos se refiere a un producto que el sistema es capaz de producir una vez que un set-up apropiado es realizado. Cada producto candidato a ser seleccionado es asociado a una orden del cliente que especifica el tipo de producto, la cantidad ordenada y la fecha (en la mayoría de los casos) en la que el trabajo debe ser completado. Cada tipo de parte requiere una secuencia de operaciones y cada una requiere una serie de herramientas de corte montadas en un almacén de herramientas de al menos una máquina del sistema. Antes de que se pueda procesar cualquier tipo de producto, se debe asegurar que todas sus operaciones pueden ser completadas, esto es, que todas las herramientas están montadas en las máquinas del sistema. Sin embargo, la capacidad limitada del almacén de herramientas puede dificultar el procesamiento simultáneo de varios tipos de partes (productos), en este caso la selección de productos a fabricar se vuelve necesaria (Denizel & Sayin, 1998).

### **3.4 SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (SFF)**

Los SFF, son de alguna forma parecidos pero a la vez diferentes de los sistemas convencionales de manufactura y proveen a la comunidad de la investigación de operaciones problemas nuevos y diferentes que resolver.

Los SFF se definen como un arreglo complejo controlado por ordenador de dispositivos automatizados de manejo de materiales y máquinas herramientas de control numérico computarizado (CNC) que pueden procesar simultáneamente volúmenes de tamaño medio de una gran variedad de tipos de partes. (Stecke K. , 1983).

Los SFF altamente integrados ofrecen la oportunidad de combinar la eficiencia de una línea transfer y la flexibilidad de un Job Shop que mejor se adaptan a la producción por lotes de productos de mediano volumen y variedad (Mahapatra & Biswas, 2007).

Según (Stecke K. , 1985) el diseño de un SFF incluye, por ejemplo, determinar el número apropiado de las herramientas de cada tipo por máquina, la capacidad del sistema de manejo de materiales y el tamaño de los buffers. La problemas de planeación incluyen la determinación de qué tipo de partes deberán ser maquinadas simultáneamente, la distribución óptima de las herramientas en grupos, la asignación de operaciones y herramientas a la capacidad limitadas de los almacenes de herramientas

en las máquinas.

Los estudios sobre los SFF empezaron a aparecer en la década de los 80's. De hecho (Stecke K. , 1983), estudió los problemas de la máquina de carga en detalle y describe seis objetivos principales:

- I. Equilibrar el tiempo de procesamiento de la máquina;
- II. Reducir al mínimo el número de movimientos;
- III. Equilibrio de la carga de trabajo por máquina para un sistema de grupos de máquinas combinadas de igual tamaño;
- IV. Desequilibrar la carga de trabajo por máquina para un sistema de grupos de máquinas combinadas de tamaños desiguales;
- V. Llenar los depósitos de herramientas tan densamente como posible.
- VI. Maximizar la suma de las prioridades de operaciones.

A un SFF se le puede considerar por contener alguno de los siguientes subsistemas (Shanker & Srinivasulu, 1989):

- a) Sistema de producción o transformación (máquinas y herramientas)
- b) Sistema de manejo de materiales (transfer)
- c) Sistema de almacenaje y retiro
- d) Sistema computarizado (varios hardware y software)
- e) Sistema de gestión (toma de decisiones para planeación, secuenciación, control etc).

La organización de las operaciones en un FMS es más compleja que la de los sistemas de fabricación convencionales, esto se debe principalmente a la versatilidad de las máquinas, que son capaces de realizar una amplia gama de operaciones de fabricación con cambios rápidos de herramientas e instrucciones que resultan en muchas rutas alternativas para el procesamiento de tipos de partes (productos).

El problema de la carga de máquina en un sistema de fabricación flexible es conocido por su complejidad, ya que abarca varios tipos de aspectos de flexibilidad relativos a la asignación, selección y operación de las partes, junto con restricciones potencialmente complejas y condicionales.

Estos problemas se han abordado teniendo en cuenta las siguientes funciones objetivo:

- I. Reducción al mínimo de desequilibrio del sistema por sí solo;
- II. La maximización del rendimiento por sí solo;

III. Reducción al mínimo de desequilibrio del sistema y la maximización del rendimiento en conjunto;

La formulación del problema de carga de máquina y las técnicas de solución en los SFF han atraído la atención de diversos investigadores por mucho tiempo. El problema de planeación dentro de los SFF fue formulado por (Stecke K. , 1983) como un integrador mixto de programación no lineal 0-1, y subsecuentemente por como un algoritmo de Branch and Bound por (Berrada & Stecke, 1986).

A pesar de que los métodos analíticos y basados en programación matemática son robustos en las aplicaciones, tienden a volverse imprácticos cuando el tamaño del problema incrementa. Esto ha motivado a los investigadores a desarrollar heurísticas más rápidas y efectivas que resuelvan problemas de gran tamaño para SFF (Kumar & Chandrashekhra, 2012).

### **3.5 PROGRAMACIÓN LINEAL.**

Algunos problemas de programación de la producción pueden ser resueltos eficientemente reduciéndolos a problemas conocidos de optimización combinatoria, como programación lineal, problemas de flujo máximo o problemas de transporte. Otros pueden ser resueltos utilizando técnicas estándar, como programación dinámica y métodos de branch and bound (Brucker, 1998).

En esencia, deben existir cuatro condiciones especiales para que pueda aplicarse la programación lineal a un problema (Chase & Aquilano, 1994):

1. Los recursos deben ser limitados, de lo contrario no habría ningún problema
2. Debe existir un objetivo explícito (como maximizar unidades o minimizar costos).
3. Las relaciones deben ser lineales.
4. Debe haber homogeneidad (son idénticos los productos que se obtienen de una máquina, o son igual de productivas las horas disponibles de un trabajador).

Otra condición tiene que ver con la cuestión de la divisibilidad: la programación lineal supone que es posible fraccionar los productos y los recursos. Si esto no es posible se puede utilizar una variante de la programación lineal, llamada programación entera.

Una vez que se resuelve el modelo, si los resultados son razonables y aceptados por la gerencia, entonces pueden ser utilizados de alguna forma, (por ejemplo, planeación), de lo contrario el problema se ha planteado incorrectamente y es necesario volver a su formulación para corregirlo.

La programación lineal nos puede ayudar a resolver el problema de carga de máquinas. Siempre que

exista un problema de asignación de recursos escasos a una variedad de usos alternativos, la técnica de la programación lineal se convierte en un método posible para alcanzar una solución óptima, pero eso no quiere decir que sea perfecta. Existen muchas aplicaciones útiles de la programación lineal para la asignación de la producción. Un tipo de aplicación es la asignación de órdenes de producción a máquinas o carga de máquinas (Powell, 1970). Después de que un problema se define, se analiza su composición y los componentes resultantes se representan por símbolos y se relacionan utilizando ecuaciones, se forma un modelo matemático el cual será resuelto a través de alguna técnica (Salkin & Saha, 1975).

El uso óptimo de los recursos de una empresa es una decisión importante de la administración. La programación óptima de la producción puede ser un determinante crítico de la rentabilidad en un entorno de manufactura altamente competitivo, frecuentemente una programación y secuenciación de la producción es complicada con demandas fluctuantes. La determinación del nivel más eficiente de inventario y producción puede derivar en grandes ahorros para los productores (Salkin & Saha, 1975).

### 3.6 PROGRAMACIÓN LINEAL MIXTA ENTERA

Una gran variedad de problemas pueden ser modelados como problemas de programación lineal mixta entera (MILP – por sus siglas en inglés) utilizando técnicas estándar para su formulación. Sin embargo, en algunos casos la MILP resultante puede ser o muy débil o muy compleja para ser resuelta de manera efectiva.

La MILP tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min c^T x \\ Ax = b \\ x \geq 0 \\ x_i \in Z \quad \forall i \in I \end{aligned}$$

Cuando todas las variables son enteras, se le llama programación lineal entera pura, y cuando todas las variables son 0 o 1 se le llama programación lineal binaria.

Cuando se incluyen variables enteras incrementa enormemente el alcance del modelo, a expensas de que este se vuelva más complejo. La programación lineal puede ser resuelta en tiempo polinomial con métodos de puntos interiores (método de la elipsoide, algoritmo de Karmarkar) (Larrosa, Oliveras, & Rodríguez-Carbonell, 2015).

La programación Entera es un problema NP-Completo, por lo tanto:

- No se conoce un algoritmo de tiempo polinomial
- Hay pocas posibilidades de que uno se encontrará jamás
- Incluso los pequeños problemas pueden ser difíciles de resolver

Debido a esta complejidad existen diferentes enfoques para resolver la programación entera.

Mientras la mayoría de los investigadores de MILP se basan en un algoritmo de Branch and Bound, también incluyen un gran número de técnicas avanzadas que hacen difícil predecir el impacto específico de una formulación alternativa. Sin embargo, existen dos aspectos en la formulación de los MILP que generalmente tienen un gran impacto: el tamaño y fortaleza de la relajación de la Programación Lineal (LP) y el efecto del “branching” en la formulación (Vielma, 2013).

El primer paso para solucionar una formulación MILP con un algoritmo de Branch and Bound es resolver la relajación de la programación Lineal la cual se obtiene dejando caer todos los requisitos de integralidad. El problema de programación Lineal resultante es conocido como la raíz de la relajación de la programación lineal y puede ser solucionado eficientemente tanto en teoría como en práctica (Vielma, 2013).

Por ejemplo (Sinriech & Meir, 1998) desarrolla una heurística basada en Algoritmos Genéticos a través de programación Lineal Mixta Entera para la asignación de herramientas y selección de procesos minimizando el costo de producción.

En un entorno de Sistemas de ensamblaje flexible (FAS) (Sawik, 2004) resuelve el problema de carga y secuenciación de máquinas a través de un enfoque exacto de Programación Mixta Entera.

Los problemas de complicada optimización combinatoria pueden ser resueltos satisfactoriamente a través de la MILP y dentro del campo de la investigación de operaciones, esta técnica es muy recurrida para resolución de una gran variedad de problemas.

### **3.7 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN ENTORNOS DE SFF.**

Para llegar a la solución óptima o cerca para el problema de carga de máquinas, las combinaciones de máquinas y operaciones asignadas son evaluados utilizando dos medidas de desempeño comunes: desequilibrio del sistema y rendimiento. Es necesario explorar cada asignación combinatoria con respecto a una función objetivo dada (minimización de desequilibrio del sistema y maximizar el rendimiento), por las limitaciones simultáneamente satisfactorios. Se encontró que el número de posibles atribuciones para ser explorado, aumenta exponencialmente a medida que el tamaño del problema aumenta.

### 3.7.1 SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS.

Para resolver el problema de carga de máquinas (Nanvala & Awari, 2011) clasifican los diferentes enfoques que se han encontrado en tres categorías:

- I. Enfoques matemáticos.
- II. Enfoques heurísticos.
- III. Enfoques basados en inteligencia artificial.

(Kuhn, 1995) formula el problema de carga de máquina como un programa lineal mixto 0-1 cuyo objetivo es el de minimizar la mayor carga de trabajo asignada a cada máquina, utilizando un procedimiento heurístico que resuelve un problema de asignación parametrizado con una función objetivo que aproxime el uso de los espacios que requieren las herramientas por las operaciones que se han asignado a cada máquina.

(Kumar, Singh, Tiwari, & Shankar, 1987) atacan el problema de carga de máquinas con la consideración simultánea de varios objetivos. Formula el problema como un problema de programación multi-criterio y utiliza un enfoque de Min-Max para su resolución. La asignación de las operaciones y herramientas necesarias entre varias máquinas, es abordado por (Mahapatra & Biswas, 2007) utilizando una mutación de optimización de enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization) para evitar una convergencia prematura con el objetivo de minimizar el desequilibrio del sistema.

(Kim & Yano, 1997) han encontrado que la maximización del rendimiento mediante el equilibrio de las cargas de trabajo en la máquina a menudo resulta en la limitación de la tardanza.

(Shanker & Srinivasulu, 1989) desarrollaron un procedimiento de Branch and Backtrack con el objetivo de maximizar la carga de trabajo asignada.

(Ponnambalam & Kiat, 2008) utilizaron la Optimización del enjambre de partículas (Particle Swarm) para resolver el problema de carga. Este algoritmo está equipado con dos métodos de búsqueda local que mejora la calidad de la solución. Aplicaron dos objetivos, minimizar el desequilibrio del sistema y maximizar la salida del sistema satisfaciendo las restricciones tecnológicas como el tiempo disponible de maquinado y los espacios de las herramientas. El modelo matemático se utilizó para seleccionar herramientas, asignar operaciones y las herramientas.

### 3.7.2 SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE SELECCIÓN DE PARTES.

(Denizel & Sayin, 1998) abordan el problema de selección de productos como un problema de programación matemática bi-criterio, en donde el objetivo además de maximizar la salida del sistema que en este caso se entiende como seleccionar la mayor cantidad de trabajos para su fabricación, minimiza también la medida total de tardanza al servir los productos.

### 3.7.3 SOLUCIÓN A AMBOS PROBLEMAS

Una heurística importante basada en el concepto de ratio de esencialidad para la maximización de la salida y minimizar el desequilibrio del sistema fue propuesto por (Mukhopadhyay, Midha, & Muralikrishna, 1992).

Recientemente (Mahmudy, Lee H., & Romeo, 2013) utilizaron Algoritmos Genéticos (AG) con codificación Real para resolver estos problemas simultáneamente. Con estos algoritmos genéticos utilizaron un arreglo real de números como cromosomas para la representación. De esta manera, la representación de los cromosomas produce solo soluciones posibles minimizando así el tiempo computacional necesario por los AG para empujar a su población hacia un espacio de búsqueda factible o reparar cromosomas no factibles.

(Tabucanon, Batanov, & Basu, 1998) resolvieron el problema de selección de partes y carga de máquinas de manera simultánea en un primer nivel y usaron el resultado en este nivel para establecer el ratio de producción en el siguiente nivel.

En la *Tabla 3.1* se agrupan diversos estudios realizados para la resolución del problema de carga y selección de partes en los SFF, se incluye el método utilizado para la solución así como el año en la que se publicaron los estudios.

AUTOR	MÉTODO DE RESOLUCIÓN	AÑO DE PUBLICACIÓN
M.T. Tabucanon, D.N. Batanov y S.Basu	Programación Matemática	1998
S. Bilgin y M. Azizoglu	Relajación Lagrangiana	2006

<b>J.H. Chen y S.Y. Ho</b>		2005
<b>A.K. Choudhary, M.K. Tiwari y J.A. Harding</b>	Algoritmos Genéticos	2006
<b>S. Biswas y S. Mahapatra</b>	Enjambre de Partículas	2008
<b>S.G. Ponnambalam y L.S. Kiat</b>		2008
<b>F.T.S. Chan y R. Swarnkar</b>	Optimización de colonia de hormigas	2006
<b>Prakrash, N. Khilwani, M.K. Tiwari y Y. Cohen</b>	Algoritmo Inmune	2008
<b>H.-W. Kim, J.-M. Yu, J.-S. Kim, H.-H Doh, D.-Lee y S.-H. Nam</b>	Heurísticas de dos niveles basadas en algoritmos de “bin-packing” y técnica de búsqueda simple	2012
<b>M.K. Tiwari, S. Kumar y R. Bardhan</b>	Sistema multi-agente	2010
<b>K. Seok, J.O. Park y Y. Keun</b>	Algoritmo evolutivo simbiótico	2011
<b>M.K. Tiwari, S. Kumar, Prakash y R. Shankar</b>	Hibridación de algoritmo genético con recocido simulado	2006
<b>Yogeswaran, Ponnambalam y M.K. Tiwari</b>		2009
<b>R. Swarnkar y M.K. Tiwari</b>	Búsqueda Tabú híbrida y recocido simulado	2004

Tabla 3. 1 Diversos métodos de resolución al problema de selección de pedidos y carga de máquinas.



# 4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

---

## 4.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se va a presentar el problema concreto a abordar, que se corresponde con el problema de selección de pedidos y carga de máquinas en un taller real de fabricación de electrodos en un horizonte de producción semanal y con una distribución tipo taller “job shop”.

En primer lugar se va a describir la empresa objeto de estudio, a continuación se describen el producto, los procesos y los recursos que se utilizan para su fabricación y finalmente se introduce la metodología a usar y que se desarrollará con detalle en el capítulo siguiente.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Fábrica Nacional de Herramientas S.A. (FANDHER®, por sus siglas abreviadas) es una empresa familiar fundada el 12 de Mayo de 1995 en la ciudad de Aguascalientes México.

En sus inicios se dedicó a la fabricación de maquinados para satisfacer las necesidades de grandes empresas nacionales y multinacionales de la industria Ferroviaria, Automotriz y Metal mecánica en general. Dentro de sus principales clientes se encontraban Nissan Mexicana, Xerox Company, Texas Instruments entre otros, así como concesionarios de las vías férreas Mexicanas tales como Ferromex, Ferrosur, Alstom, Kansas City Southern.

Inicia sus trabajos en un pequeño taller de 160 m<sup>2</sup> contando con una plantilla de 4 personas y una maquinaria que en su mayoría había sido adquirida en 1995 como parte de un lote de máquinas convencionales.

Durante muchos años se dedicó a la producción de Buriles Calzados norma ANSI, con la parte operante de Carburo de Tungsteno, productos utilizados para el maquinado de piezas en Tornos. Otra de sus principales líneas se dedicó a la fabricación de Brocas de vía utilizadas para la colocación y el mantenimiento de las vías del ferrocarril.

Desde 1997 FANDHER® inicia con la fabricación de Electrodo para Soldadura por resistencia, elaborados a partir de aleaciones de cobre. A partir del 2000 se introduce de manera fuerte en este mercado haciéndose con contratos para proveer de Electrodo a un grande multinacional.

FANDHER® se encuentra actualmente emplazado en lo que antes era una nave dedicada a la producción Textil. En el año 2013 se realizó la compra de dicha nave y se realizaron reformas de

acondicionamiento para poder realizar la mudanza desde el antiguo taller.

La nave cuenta con 2000 m<sup>2</sup> de construcción dividido en 4 grandes áreas: producción, almacén, soporte funcional (ingeniería, calidad) y el área de oficinas.

Se trabaja conjuntamente con otra empresa de la misma familia, llamada Arro de México S.A de C.V, la cual se dedica a la comercialización y distribución de herramientas de corte; y en el caso de FANDHER® es la empresa que lleva la parte comercial, contable y de ciertas operaciones como son las compras de materiales y gestión de aduanas. Esta empresa se encuentra ubicada a 20 km de distancia aproximadamente en lo que antiguamente eran las oficinas comunes y el taller de producción de FANDHER.

FANDHER® se encuentra catalogada como Industria pequeña según la clasificación que realiza el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) “*Industria pequeña: Las empresas que ocuparan hasta 100 personas y sus ventas netas no rebasaran la cantidad de 400 millones de pesos al año<sup>4</sup>*”. (22 millones euros aproximadamente)

Actualmente se emplean entre ambas empresa un total de 35 personas de las cuales 23 están dedicadas a FANDHER.

#### **4.3 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO**

Actualmente la producción de FANDHER cuenta con varias líneas, siendo estos tres sus productos principales:

- I. Electrodo
- II. Buriles Calzados
- III. Brocas para perforado de vía.

Buriles y Electrodo tienen líneas de producción dedicadas y exclusivas y no comparten maquinaria entre sí, mientras que las brocas para perforado de vía comparten algunas máquinas con la línea de electrodo. Todas las líneas presentan áreas de oportunidad para mejora, sin embargo, para efectos de este trabajo nos centraremos en la línea de Electrodo, ya que hoy en día es la línea de producción más importante y con mayores miras de crecimiento. Dentro de la línea de electrodo se tienen más de 800 referencias vigentes diferentes.

---

<sup>4</sup> Fuente: [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/pdf/Mono\\_Micro\\_peque\\_mediana.pdf](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/pdf/Mono_Micro_peque_mediana.pdf) consultado el 12/10/15

### 4.3.1 ELECTRODOS.

Dentro de la soldadura, un electrodo es una varilla metálica, de composición aproximada a la del metal a soldar y recubierta con una sustancia que recibe el nombre de revestimiento. Cuando se establece una corriente a través del circuito de soldadura, salta un arco eléctrico entre el extremo del electrodo y la pieza, este arco provoca una fusión del electrodo y del metal base. El metal fundido cae en el cráter originado por la fusión del metal base y se forma un baño de fusión (Giachino & Weeks, 1981).



Figura 4. 1 Ejemplo de un Electrodo

En términos generales esa es la función de los electrodos en el mundo de la soldadura, sin embargo los Electrodo fabricados por FANDHER® son usados para la Soldadura por Resistencia SIN aporte de material, que es uno de los muchos métodos usados para unir dos o más piezas de metal. Algunos de estos métodos son nombrados a continuación con el propósito de demostrar cómo la soldadura por resistencia se diferencia de ellos:

- I. Atornillado
- II. Remachado
- III. Soldadura de plata
- IV. Soldadura de arco
- V. Soldadura por resistencia

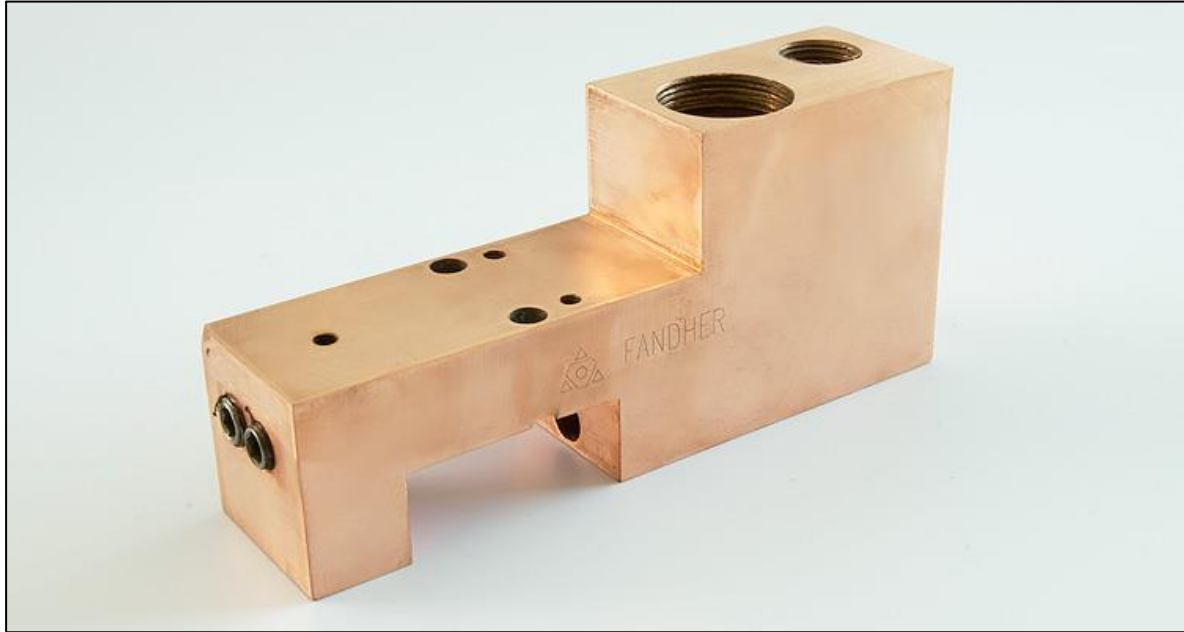


Figura 4. 2 Ejemplo de otra geometría de Electrodo

El Atornillado, Remachado y Soldadura de Arco requieren que se les añada un material de aporte al metal que está siendo soldado. Además, el atornillado y remachado requieren que se le abran agujeros al metal para que los tornillos puedan entrar. La Soldadura por Resistencia no requiere de ningún material adicional o agujeros en el Metal.

Estos electrodos son fabricados con materiales de la más alta calidad en las siguientes aleaciones:

- I. Aleación cobre clase II (Cobre Cromo)
- II. Aleación clase III (Cobre-Berilio con Níquel o plata)
- III. Aleación clase IV = (Cobre Berilio)
- IV. Aleación Clase 10 (Cobre Tungsteno)
- V. Clase 11 (cobre Tungsteno)
- VI. Clase 12 (Cobre Tungsteno)
- VII. Clase 13 (Tungsteno)
- VIII. Clase 14 (Molibdeno)
- IX. Custom made: materiales especiales, (v.gr.: H13)

Existen diversas aplicaciones de los electrodos dentro de industria y una gran cantidad de productos distintos que se sueldan a través del uso de los Electrodo; los electrodos fabricados por FANDHER® se utilizan entre otras cosas para la soldadura de:

- I. Soldadura de tarjetas electrónicas
- II. Llantas de automóviles (en México llamadas Rines)

### III. Soldadura de lámina de carrocería de vehículos

## **4.4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.**

### **4.4.1 INTRODUCCIÓN**

Como se mencionó anteriormente, en sus inicios FANDHER® se encontró ubicada en un pequeño taller de producción de 160 m<sup>2</sup>. Al ser un espacio tan pequeño impedía que se pudiera pensar en una reconfiguración del Layout, y por la disposición de las máquinas, el material realizaba muchos recorridos de un lugar a otro, los almacenes de materiales y herramientas estaban distribuidos en espacios que no eran convenientes para su acceso y muchas veces había interferencias entre el propio personal. Diferentes medidas se adoptaron y conforme se adquirieron máquinas más modernas se les apartó del resto dentro de habitaciones separadas, puesto que requerían ciertas condiciones de espacio y clima que no se lograban en el taller, lo que hizo que los movimientos que de por sí había, se hicieran todavía mayores.

En el año 2014 se realizó la compra de una nueva nave industrial de 2000 m<sup>2</sup> a la cual se trasladaron todas las máquinas y el personal que se encontraba en el antiguo taller, para pasar a parecer más una fábrica que un taller.

Si bien este trabajo no pretende optimizar nada referente a la configuración del Layout, se consideró oportuno mencionar esta condición para que se entienda la historia de la Empresa y su evolución hasta su situación actual.

A continuación se describirá la manera en la que está configurada la línea de producción de Electrodo dentro de este nuevo entorno de fabricación.

### **4.4.2 CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN**

Nuestro escenario de partida es la línea de producción de electrodos, cuyos recursos son los siguientes:

#### **4.4.2.1 MAQUINARIA.**

Existen 9 máquinas dentro de la línea distribuidas en forma paralela; esta distribución se planeó originalmente al momento de realizar el cambio de planta con el fin de reducir las distancias recorridas por personal y materiales entre una estación de trabajo y otra. Cada una de estas máquinas trabaja como si fuera un centro de trabajo propio.

Las máquinas con las que se cuentan son las siguientes:

- 1) HAAS. Centro de maquinado de 4 ejes de movimiento y almacén con capacidad de 10 herramientas.
- 2) Chevalier FCL 820: Centro de maquinado de 5 ejes de movimiento y almacén con capacidad de 10 herramientas.
- 3) Fresadora PROTOTRACK SNX CNC. Fresadora con 3 ejes de movimiento, Control Numérico Computarizado.
- 4) Torno PROTOTRACK SNX CNC. Torno con 2 ejes de movimiento, Control Numérico Computarizado (CNC).
- 5) Fresadora SATURNO I. Fresadora con 2 ejes de movimiento, de tipo manual.
- 6) Fresadora SATURNO II. Fresadora con 2 ejes de movimiento, de Control Numérico Computarizado.
- 7) Torno Haringer (de boquillas). Torno con 2 ejes de movimiento.
- 8) Torno McLane. Torno con 2 ejes de movimiento.
- 9) Rectificadora B&S. Bastidor que contiene una muela giratoria compuesta de granos abrasivos duros y resistentes al desgaste y la rotura utilizada para el mecanizado por abrasión.



Figura 4. 3 Ejemplo de la maquinaria utilizada para la producción

#### 4.4.2.2 LAYOUT.

La ubicación de las máquinas dentro de la planta se ilustra en la figura 3.1:

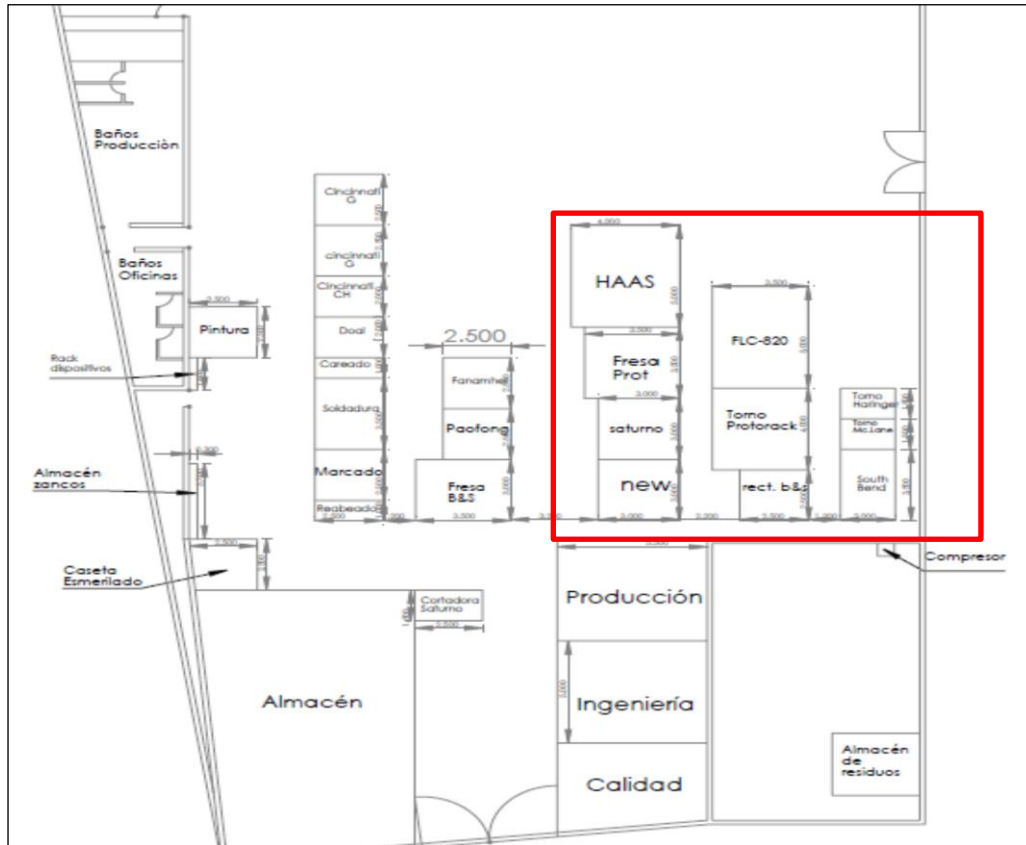


Figura 4. 4 Configuración del layout actual de la empresa

#### 4.4.2.3 PERSONAL.

Actualmente se cuenta con una plantilla de 10 personas (dentro de esta área) encargadas de la producción; 9 de ellos son únicamente operadores de las máquinas y 1 funge como operador y responsable de la línea. Dado que las distancias entre las máquinas es muy corta, son los mismos operarios los que al término de cada pieza o lote, los transfieren a la estación siguiente según sea el caso.

El personal que opera en esta línea de producción por lo general se dedica al trabajo de un tipo de máquina específico. A pesar de varios intentos por formarlos en la operación de diferentes máquinas, por diversos motivos, que no se tratarán en este trabajo, no ha sido posible generar la multi-habilidad de los operarios, lo cual supone una reducción en la flexibilidad de la línea, puesto que es dependiente de cada una de las personas.

#### 4.4.3 PROCESO DE FABRICACIÓN.

Todos los electrodos se fabrican siguiendo un proceso general similar. Existen diferencias entre algunos de ellos, pero para efectos de este trabajo se considerará como igual.

A continuación se describe la forma en la que actualmente se programa la producción a partir de la recepción de un pedido.

- I. El cliente envía una orden de compra por medio de un correo electrónico en donde especifica el código del producto solicitado y la cantidad de piezas que necesita. En la Figura 4.5 se puede observar un ejemplo de cómo se recibe. Dependiendo del cliente, se introduce una fecha exacta de entrega del producto, de lo contrario es la propia fábrica la que estima una fecha de entrega.

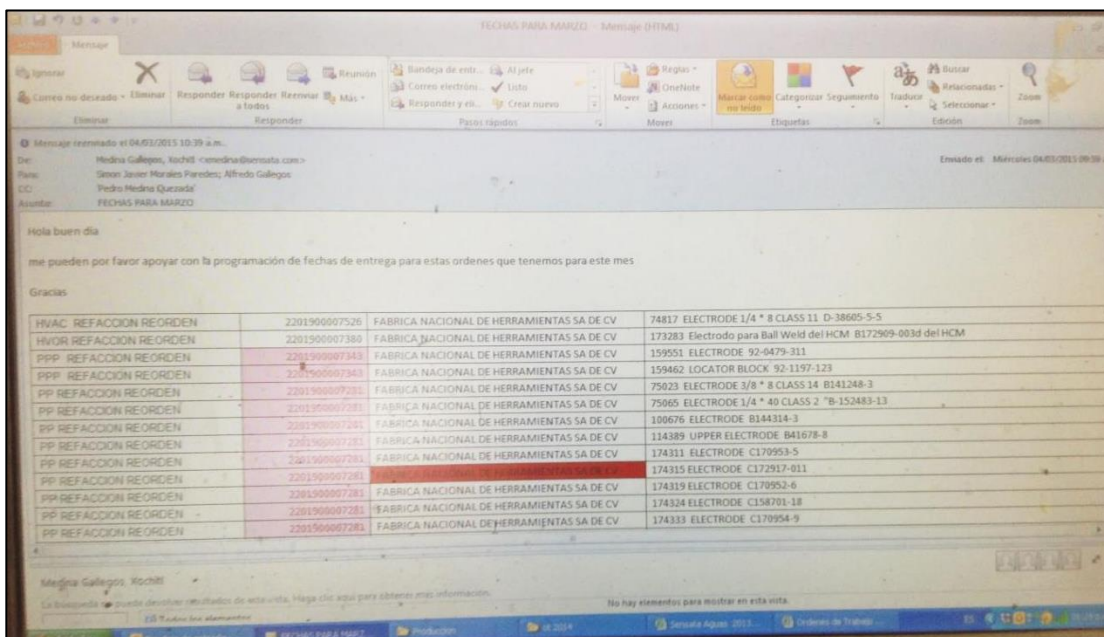


Figura 4. 5 Ejemplo de cómo se reciben las órdenes de compra por parte de los clientes.

- II. Se realiza el BOM<sup>5</sup> para cotejar contra existencias en los almacenes de la fábrica y saber si es suficiente para cubrir la demanda o si es necesario solicitar más material. El almacén realiza un requerimiento de piezas y genera un archivo llamado “Órdenes de trabajo” e imprime una hoja con las especificaciones del trabajo ilustrados en la Figura 4.6

<sup>5</sup> BOM: Bill of Materials, por sus siglas en inglés, es la lista de materias primas, sub-ensambles, ensambles intermedios, sub-componentes, partes y cantidades necesarias de cada una para fabricar el producto terminado. The Free Dictionary. Consultado el 06/08/2015 en: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Bill+of+materials>



FANDHER® FABRICA NACIONAL DE HERRAMIENTAS S.A. DE C.V.		CARATULA DE ORDENES A FABRICAR									
PO	ORDEN DE TRABAJO	FECHA PEDIDO	FECHA PROMESA	MÁXIMO	CANT	DESCRIPCIÓN	CLASE MATERIAL	MEDIDAS DEL MATERIAL	LONG DEL ELECTRODO	BARRAS A PEDIR	1a Cant.
PO 2201900007281	21915	25/02/2015	18/03/2015	75023	16	B141248-3	3	5/8 Ø	0.625	1	
							14	3/8 Ø	1.000	0	
PO 2201900007281	21916	25/02/2015	18/03/2015	75065	1	B152483-13	2	1/4 Ø	2.625	1	
PO 2201900007281	21917	25/02/2015	18/03/2015	100676	51	B144314-3	2	3/4 Ø	0.250	1	
PO 2201900007281	21918	25/02/2015	18/03/2015	114389	4	B41678-8	11	1/4 Ø	2.125	2	
PO 2201900007281	21919	25/02/2015	18/03/2015	174311	3	C170953-5	2	1/2 Ø	3.125	1	
							11	3/8 Ø	1.255	0	
PO 2201900007281	21920	25/02/2015	18/03/2015	174315	3	C172917-011	2	1/2 Ø	2.875	1	
PO 2201900007281	21921	25/02/2015	18/03/2015	174319	3	B170952-6	2	1/2 Ø	3.125	1	
							14	3/8 Ø	1.260	0	
PO 2201900007281	21922	25/02/2015	18/03/2015	174324	3	B158701-18	2	1/2 Ø	3.125	1	

Figura 4. 6 Ejemplo de formato de órdenes a fabricar

- III. Una vez emitido el archivo “Órdenes de trabajo” se divide el trabajo a diferentes áreas: Calidad, Producción y almacén. El área de calidad deberá realizar la trazabilidad del pedido y programar el muestreo aleatorio de piezas. Almacén preparará los elementos necesarios para enviar los productos una vez terminados. Producción realizará la programación de la producción y la generación de fechas de entrega.
- IV. Una vez cuantificado el material, se toman los planos de los electrodos y se crea una “Hoja viajera” que contendrá toda la información del lote de productos del mismo tipo que han de

FANDHER® FABRICA NACIONAL DE HERRAMIENTAS S.A. DE C.V.		HOJA VIAJERA EH3													
Nº Máx.:	74807	Fecha de pedido:	07/11/2014		Cantidad de Pedido:	8									
O.T.:	21598	Fecha promesa:	28/11/2014		Clase de material:	3									
Cliente:	Sensata Technologies				Medida del material:	1/4 x 3/8									
Operación	Medida	Simbolo	Área/M. áq.	1er Entrega				2da Entrega				3ra Entrega			
1 Corte	3.125	O		Cant.	Fecha	Responsab.	RW	Fecha	Responsab.	RW	Fecha	Responsab.	RW	Fecha	Responsab.
2 Carear	Limpiar	O													
3 Longitud	3.000	O													
4 Espesor	0.165+/-0.003	O													
5 Ancho	0.375	O													
6 Barr Pasado	0.133"	O													
7 Barr Mach (2	TAP 8-32	O													
8 Chafalón	19°	O													
9 Marcado		O	P												
10 Pulido		O	P												
11 Lavado		O	L												
12 Insp. Final		O	C												
13 Empacado		O	C												
Entrega de Producto Terminado de PRODUCCIÓN a CALIDAD															
1er Entrega				2da Entrega				3ra Entrega							
Cantidad	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.
Entrega de Producto Terminado de CALIDAD a ALMACÉN															
1er Entrega				2da Entrega				3ra Entrega							
Cantidad	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.
Recibo de Producto Terminado (Almacén)															
1er Entrega				2da Entrega				3ra Entrega							
Cantidad	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.	Fecha	Responsable	Cant.
Cantidad total	Observaciones:														
Firma de															

Figura 4. 7 Ejemplo de Hoja Viajera que acompaña a cada electrodo a fabricar

fabricarse: Código del producto, Fecha del pedido, Fecha promesa de Entrega, Cantidad del pedido, Tipo de material, Operaciones necesarias en el producto, se muestra un ejemplo en la Figura 4.7.

El dibujo/plano del electrodo así como su hoja viajera son entregados al responsable de la línea para que realice la distribución de la carga.

- V. El responsable de la línea distribuye la carga de producción a las diferentes máquinas, basándose en su experiencia. Esta asignación la realiza porque conoce en que máquina se produce cada electrodo, así como las capacidades que tiene cada uno de sus operarios. Dado que existen máquinas similares puede optar por asignarlo a una u otra dependiendo del operador que esté.
- VI. Una vez fabricado todo el pedido este se envía al almacén para que proceda con el empaquetado del toda la orden y su posterior envío.

Este es el procedimiento que sigue cada Electrodo para ser fabricado descrito de manera muy general, varía entre cada uno el tipo de operaciones, máquinas materiales y herramientas que se utilizan, algunos de ellos incluso siguen un procedimiento diferente al antes descrito, puesto que son considerados “especiales” ya sea por el cliente al que van destinado o si estos utilizan materia prima delicada y de alto costo o por el tamaño del Producto Terminado.

#### **4.5 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.**

FANDHER® es una PyME manufacturera de grado 2 (Tier 2<sup>6</sup>), puesto que suministra herramientas maquinadas a empresas de mayor tamaño las cuales suelen fabricar sub-ensambles con dichos maquinados y surtir así a las fábricas automotrices.

Cada una de las empresas a las cuales FANDHER® maquila, realiza sus pedidos de manera distinta y en diferentes periodos de tiempo. Algunas de estas empresas disponen de su programa mensual de producción, el cual hacen llegar a FANDHER® al final de cada mes. Esto hace posible que se realice la planeación de materiales y que se elabore el plan de producción. Sin embargo existen otras empresas que no proveen esta información con ningún tipo de anticipación; suelen enviar sus requisitos de producción junto con una fecha esperada de entrega. El canal de entrada de información es el mismo, esto es, siempre es el mismo departamento el que recibe la solicitud, sin embargo, la manera en la que se recibe la información es diferente por parte de cada cliente y en ocasiones el mismo cliente realiza sus solicitudes siguiendo un formato diferente. Todo esto obliga a que la

---

<sup>6</sup> Tier 2: Empresas que entregan partes a las empresas Tier 1, las cuales atienden directamente a las empresas automotrices. Fuente: <http://www.cnnexpansion.com/expansion/2012/01/30/el-corazon-automotriz>.

información se vuelva a procesar para dejarla en el lenguaje de la empresa.

Las partidas suelen estar conformadas por un gran volumen de órdenes de trabajo diferentes, cada una con un volumen de producción que puede variar desde 1 sola pieza a fabricar hasta 300 piezas (por ejemplo). Los tiempos de fabricación de los electrodos son muy variados, desde piezas que requieren tan solo unos pocos minutos de fabricación, hasta piezas que rondan 1hr de fabricación o más. Los clientes suelen dar su propia prioridad a los productos que solicitan, de modo que una vez recibidas todas las partidas, se tiene que asignar prioridades que combinen las de los clientes, de modo que se intente satisfacer la demanda de todos.

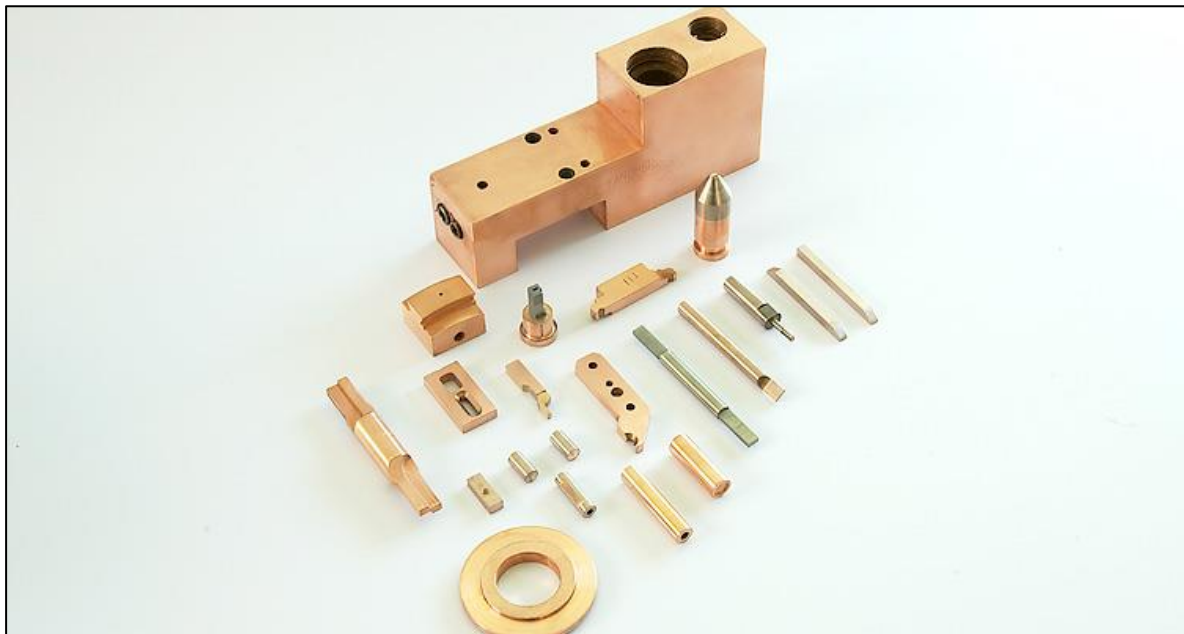


Figura 4. 8 Diferentes variedades de Electroodos fabricados

El tener muchas órdenes, pocas piezas, diferentes rutas y tiempos para cada producto hace que la cantidad de combinaciones posibles de distribución de carga en las máquinas sea demasiado elevada como para ser capaz de abordarla de forma manual y que la distribución sea óptima; además de no tener la certeza si se será capaz de cumplir con todos los pedidos o si habrá algunos que no se podrán hacer.

Otro problema muy grande del bajo volumen de productos y gran cantidad de partidas es que para cada cambio de modelo se debe realizar un Set-Up, el cual se realizará de forma manual, por lo que la máquina se debe detener y realizar la preparación.

A esta problemática debemos añadir que en muchos casos, una vez realizada la planeación de la producción se reciben modificaciones por parte del cliente, el cual suele cambiar la prioridad de entrega de los productos o modificar la cantidad deseada, lo cual conlleva una modificación a todo el plan. Por último, es común que en cada pedido se incluyan artículos que no se habían fabricado

antes, a ellos se les anexa un plano con las especificaciones del producto a fabricar y en ocasiones la materia prima que se necesita para su fabricación, puesto que dependiendo del tipo de soldadura y conductividad que requieran del material, será una u otra aleación la que se le asigne al electrodo. Este tipo de modificaciones de último momento obligan a reestructurar el trabajo, y cada pedido nuevo o modificado debe seguir un proceso “burocrático” que ralentiza el avance en fábrica.

A lo largo del tiempo y utilizando los medios disponibles por parte del personal, se han ido realizando hojas de Microsoft Excel® en las cuales se intentan hacer las funciones de un ERP que gestione los requisitos de materiales por cada producto que se debe fabricar. Esto es de gran ayuda porque facilita la labor del personal del almacén para a su vez solicitar los materiales que va a necesitar.

El personal se ha valido con los conocimientos adquiridos a través de la experiencia para desarrollar sencillos programas, con ayuda de Microsoft Excel® en su mayoría, que les permitan automatizar ciertas funciones; sin embargo no tienen ningún fundamento teórico o matemático, sino que han sido realizadas a modo de prueba y error.

En lo que respecta a la programación de la producción, en concreto a la carga de maquinaria y selección de que órdenes podrán producirse no existe ninguna metodología para su realización; esto se hace completamente por experiencia de la persona responsable del proceso, basándose en sus conocimientos sobre las operaciones que puede realizar cada máquina, y en el histórico, esto es, dónde se han realizado anteriormente, con el conocimiento que tiene sobre las tareas que cada operario es capaz de realizar y estima el tiempo que cada uno podría tardarse en realizar el trabajo asignado en función del tiempo estándar de fabricación. Este método ha funcionado medianamente bien, sin embargo está basado completamente en la persona y no en un sistema. Esto lleva a que al faltar la persona conocedora del taller, se suelen tomar decisiones poco acertadas a la hora de organizar la producción.

Al final todo se traduce en un continuo estrés dentro del taller, puesto que la mayor parte del tiempo se trabaja de manera “urgente” y se cambian constantemente los planes, rompiendo el ritmo de fabricación, generando desperfectos y al final del día no se completan los trabajos programados, alimentando la lista de adeudos con el cliente.

#### **4.6 DEFINICIÓN CONCEPTUAL DEL PROBLEMA.**

Hemos visto que dentro de la empresa existen varios problemas que es necesario resolver, sin

embargo, es importante centrar el problema en un aspecto concreto que se posible resolver, en este caso, por medio de programación matemática.

Hemos visto en el capítulo anterior cómo diferentes autores abordan dos problemas muy significativos dentro de la fabricación: la carga de máquinas y la selección de pedidos.

Dentro de la problemática que se ha descrito de la empresa encontramos claramente estos dos problemas. Por un lado se realiza una carga de máquinas que en muchas ocasiones no es eficiente, puesto que no se llegan a considerar todos los aspectos que influyen, debido a la gran combinación de posibilidades, que lo deja prácticamente imposible de alcanzar con medios convencionales, como son las hojas de cálculo o el tradicional “prueba y error”.

Por otro lado tenemos el problema de selección de pedidos; en ocasiones no será posible realizar todos los pedidos que se han solicitado dentro del horizonte planificado. Cuando éste sea el caso, es muy importante saber qué pedidos se deben hacer en base a la prioridad que cada uno tiene y qué pedidos se tendrá que dejar para una posterior programación, de modo que se cumpla adecuadamente con el plan y la prioridad de cada cliente. De igual manera, con esta programación, es posible brindarle al cliente una fecha estimada de entrega del pedido.

Para resolver ambos problemas se desarrollará en el siguiente Capítulo un modelo de programación matemática resuelto a través de software específico de Programación Lineal Mixta Entera. Previamente se plantea una breve introducción a los problemas de Programación Lineal Mixta Entera.

# 5. MODELADO DEL PROBLEMA

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se va a presentar un modelo de selección de pedidos y carga de máquinas con rutas alternativas para talleres tipo “job-shop”, particularizado para el sistema de fabricación objeto de estudio. Para ello, en primer se plantea el enunciado del problema a analizar y a continuación se muestran los datos disponibles en el sistema real. Finalmente se plantea el modelo lineal que se ejecutará en el siguiente capítulo con varios escenarios.

## 5.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

Para elaborar el modelo de selección de pedidos y carga de máquinas en un taller tipo job-shop se considerará un sistema conformado por una serie de estaciones de máquinas. Cada estación posee máquinas idénticas funcionalmente hablando, esto es, son capaces de realizar las mismas operaciones. Cada pedido se considera un solo producto a fabricar con una cantidad o demanda de cada uno conocida.

Cada producto tiene varias rutas alternativas por las cuales puede ser fabricado. Para cada ruta se especifica la máquina en la cual será fabricado, el tipo de herramienta que utiliza y el tiempo de procesamiento en dicha ruta.

Con respecto a cada tipo de herramienta, se proporciona el tiempo de vida útil el cual varía en función del tamaño y material de cada herramienta. Se conoce la cantidad de copias disponibles y el espacio que ocupa cada una de ellas en el almacén de herramientas de la máquina que lo posea.

En resumen, el modelo considera no solo almacenes finitos de herramientas, sino también un número limitado de herramientas disponibles, de vidas útiles limitadas, asignación duplicada de herramientas, etc.

Para la formulación del problema, se conoce el horizonte de planificación, de forma que tanto la asignación de rutas que seguirán los productos seleccionados como la asignación de herramientas a máquinas serán para ese horizonte, y hasta que finalice el periodo no se podrá volver a cargar el sistema de nuevo.

En el modelo se van a añadir restricciones que traten de equilibrar los tiempos de las estaciones. Para

ello, se consideran además de los tiempos de procesado de cada producto, un tiempo de preparación de cada pedido en cada máquina si se utilizase. El equilibrado de los 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.

Se debe mencionar que el sistema que analizaremos no posee todos los elementos de un Sistema de Fabricación Flexible como se ha definido anteriormente. Elementos de un SFF como son un carro filo guiado para el transporte de materiales, o un “cerebro central” que controle todas las operaciones que se realizan no están presentes en este sistema. Sin embargo, las distancias para el transporte de materiales son tan cortas que se consideran despreciables. Igualmente, al no contar con un sistema automatizado de cambio de herramienta, el modelo incorpora la consideración de los tiempos de Set-Up para cada producto en cada máquina, de esta forma cada vez que un producto se termina de procesar en la máquina y la ruta que le corresponde, la máquina en cuestión deberá ser preparada para fabricar el siguiente.

Para el sistema objeto de estudio, el horizonte de planificación es semanal y las demandas fueron obtenidas a través de datos históricos de los años 2013 y 2014; y comparadas contra datos en los meses de Abril y Mayo del año 2015, de manera que pudiera determinarse un volumen de producción semanal, el cual nos servirá como horizonte de planificación. Las rutas de procesado de cada producto originalmente son únicas para evitar un mayor cálculo del plan de producción real. Sin embargo, para este trabajo se incorpora una segunda ruta alternativa para cada producto a partir de la experiencia del director de la línea de producción.

### 5.3 DATOS DEL PROBLEMA

- Se cuenta con 9 estaciones de trabajo ( $j=1..9$ ) con 1 máquina por estación ( $m_j=1$ ).
- Para fabricar los diferentes productos se utilizan 6 tipos de herramientas ( $k=1..6$ ), mostradas en la Tabla 5.1.

k	Nombre
1	Broca 9/32 Ø
2	Cortador Carburo 1/4" Ø
3	Broca No. 36 Ø

4	Cortador Carburo 1/8" Ø
5	Broca 1/4" Ø
6	Broca de 125 Ø

Tabla 5. 1 Número y tipo de herramientas utilizadas

- En la Tabla 5.2 se muestra por cada tipo de herramienta la cantidad de copias disponibles ( $A_k$ )

$k:$	1	2	3	4	5	6
$A_k:$	8	10	15	13	7	15

Tabla 5. 2 Copias disponibles por cada herramienta

- La capacidad de los almacenes de herramientas de cada máquina se exponen en la Tabla 5.3

MÁQUINA ( $j$ )	NOMBRE	CAPACIDAD DEL ALMACÉN DE HERRAMIENTAS ( $C_j$ )
1	HASS 1	10
2	FRESA PROTOTRACK 1	10
3	TORNO PROTOTRACK 1	15
4	CHEVALIER FCL 820	10
5	SATURNO	15
6	SATURNO NUEVA	15
7	TORNO HARINGER	15
8	TORNO MCLANE	10
9	RECTIFICADORA B&S	10

Tabla 5. 3 Capacidad de los almacenes de herramientas



- El número de posiciones que ocupa cada herramienta en el almacén es igual a uno ( $S_{jk}=1$ ).
- La vida útil de cada herramienta varía en función del tamaño de la herramienta, la vida útil ( $L_k$ ) de cada herramienta se detalla en la Tabla 5.4.

Herramienta ( $k$ )	Vida útil ( $L_k$ )
1	125
2	300
3	325
4	150
5	350
6	200

Tabla 5.4 Vida útil de las herramientas

Se deben fabricar 18 piezas diferentes ( $p=1,\dots,18$ ). En la Tabla 5.5 se muestra para cada pieza a fabricar ( $p$ ): la cantidad demandada ( $D_p$ ) y la prioridad de fabricación ( $W_p$ ), la prioridad es mayor en tanto mayor sea la cantidad demanda del producto. Se han estimado en base a fechas de entrega, sumando en este caso 1.

Pedido ( $p$ )	Producción ( $D_p$ )	Prioridad ( $W_p$ )
1	31	0,070
2	35	0,100
3	50	0,060
4	10	0,051
5	10	0,090
6	50	0,048
7	10	0,040
8	36	0,049
9	56	0,080

10	30	0,030
11	28	0,050
12	14	0,047
13	7	0,047
14	36	0,047
15	8	0,030
16	12	0,053
17	5	0,053
18	10	0,055

Tabla 5.5 Demanda del período

Cada pieza tiene 2 rutas alternativas ( $r=1, 2$ ) para su fabricación y cada ruta consiste en 1, o 2 operaciones. En la Tabla 5.6 se muestra para cada pieza las rutas y el orden de sus operaciones, indicándose para cada operación: la máquina requerida (estación), el tipo de herramienta ( $k$ ) requerida y el tiempo de la operación (en minutos).

$D_p$	$p$	$r$	$j_1$	$k_1$	TIEMPO1	$j_2$	$k_2$	TIEMPO2
31	1	1	9	3	47.5	6	2	31
	1	2	1	3	30			
35	2	1	3	4	12			
	2	2	7	4	16			
50	3	1	7	1	20			
	3	2	2	1	11			
10	4	1	3	3	40			
	4	2	7	3	26			
10	5	1	3	3	42	2	3	25
	5	2	4	3	10			

50	6	1	8	6	37.5	5	4	17
	6	2	4	6	20			
10	7	1	2	3	50			
	7	2	6	3	13			
36	8	1	7	5	20	5	6	29
	8	2	3	5	3.5	2	5	6
56	9	1	1	2	39			
	9	2	2	2	17			
30	10	1	7	4	14.7	2	3	12
	10	2	3	4	12.5	6	4	6
28	11	1	3	4	23	6	6	30
	11	2	7	4	17	2	1	7
14	12	1	6	3	13	2	5	27
	12	2	2	3	11	6	3	27
7	13	1	3	5	47	6	6	27
	13	2	7	5	10	2	5	17
36	14	1	4	5	59			
	14	2	2	5	20			
8	15	1	2	4	15.6			
	15	2	6	4	16.4			
12	16	1	2	3	38.25			
	16	2	6	3	40			
5	17	1	5	1	55			
	17	2	6	1	11.5			
10	18	1	2	5	12.58			
	18	2	6	5	15.9			

Tabla 5. 6 Características de las operaciones de cada pedido

Al modelo se le hace una nueva incorporación, se considerará el tiempo disponible que cada máquina tiene en el horizonte definido de una semana, de modo que no se pueda cargar una máquina en ese periodo más del tiempo disponible que tiene.

Cada máquina está sujeta a distintas condiciones que merman su capacidad total teórica disponible. Estas condiciones son: paros por juntas de inicio y fin de turno, paro para descanso del personal y paros por mantenimiento debido a averías en las máquinas. En las máquinas 8 y 9 el tiempo disponible es menor puesto que no se utilizan los 5 días de la semana, ya que, al compartir el trabajo con otras máquinas para la fabricación de otros productos, se utilizan 1 y 1,5 días de su tiempo para este fin. En la Tabla 5.7 se muestra para cada máquina, su tiempo disponible  $TD_j$ :

Máquina ( $j$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tiempo Disponible ( $TD_j$ )	2200	2290	2290	2200	2200	2200	2200	1880	1585

Tabla 5.7 Tiempo disponible por máquina

Al modelo se le realiza otra extensión, en la cual se considera el tiempo de *Set-Up* de cada máquina. Como se mencionó al principio, debido a que no funciona como un SFF automatizado y la función de Set-Up debe ser realizado de forma manual. Cada producto en cada máquina tiene un tiempo de Set-Up diferente. Este tiempo solo se considera una vez por cada producto, puesto que una vez que se inicia con la fabricación del lote este se termina por completo antes de realizar cambios en la máquina. Al finalizar la fabricación de un producto ( $p$ ) en la máquina ( $j$ ) de la ruta ( $r$ ), a dicha máquina se le realizará un Set-Up en caso de que otro producto pase por ella, esta operación se realiza de forma manual por parte del operario encargado de dicha máquina. La información está desplegada en la Tabla 5.8 (en minutos).

<i>Tiempo de Set-up de las máquinas</i>					
		OP1		OP2	
$p$	$r$	$j_1$	TIEMPO1	$j_2$	TIEMPO2
1	1	9	5.0	6	5.0
	2	1	10.0		
2	1	3	6.0		
	2	7	1.0		

3	1	7	5.0		
	2	2	5.0		
4	1	3	5.0		
	2	7	3.0		
5	1	3	5.0	2	4.0
	2	4	7.0		
6	1	8	5.0	5	3.0
	2	4	7.0		
7	1	2	6.0		
	2	6	0.0		
8	1	7	5.0	5	3.0
	2	3	3.5	2	4.0
9	1	6	5.0		
	2	2	4.0		
10	1	7	5.0	2	5.0
	2	3	6.0	6	
11	1	3	6.0	6	5.0
	2	7	0.0	2	5.0
12	1	6	6.0	2	5.0
	2	2	4.0	6	0.0
13	1	3	3.5	6	0.0
	2	7	5.0	2	5.0
14	1	5	3.0		
	2	2	4.0		
15	1	2	10.0		
	2	6	0.0		
16	1	2	5.0		
	2	6	0.0		

17	1	5	3.0	
	2	6	0.0	
18	1	2	4.0	
	2	6	0.0	

Tabla 5. 8 Tiempos de Set-Up de cada pedido en cada máquina

## 5.4 MODELO DE SELECCIÓN DE PEDIDOS Y CARGA DE MÁQUINAS

A continuación se muestra el modelo de selección de pedidos y carga de máquinas con rutas alternativas en el sistema de fabricación objeto de estudio.

### Conjunto de índices:

$p = \{1..18\}$  número de piezas (se entiende también como pedido)

$j = \{1..9\}$  número de estaciones

$k = \{1..6\}$  número de herramientas

$r = \{1..2\}$  número de rutas alternativas

### Datos del problema

$W_p$  es la prioridad de la pieza  $p$

$D_p$  es la demanda de la pieza  $p$

$m_j$  es el número de máquinas por estación

$A_k$  es el número máximo de copias disponibles de la herramienta  $k$

$C_j$  es la capacidad del almacén de herramientas de la estación  $j$ .

$S_{jk}$  es el número de posiciones de cada herramienta  $k$  en el almacén

$L_k$  es la vida útil de la herramienta  $k$

$T_{prjk}$  es el tiempo de operación de la pieza  $p$  por la ruta  $r$  en la estación  $j$  usando la herramienta  $k$

$TD_j$  Tiempo disponible de la máquina  $j$

$ST_{prj}$  es el tiempo de set up del producto  $p$  en la máquina  $j$  por la ruta  $r$

Variabes de decisión del problema

$$Y_p \begin{cases} 1 \text{ si la pieza } p \text{ es seleccionada para su fabricación} \\ 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

$\zeta_{jk}$  es el número de copias de la herramienta  $k$  en la máquina de la estación  $j$

$\Theta_{pr}$  es la fracción de la pieza  $p$  (del pedido) realizado por la ruta  $r$

$u_j$  es la carga de trabajo en la máquina de la estación  $j$ .

$\gamma_{pr} \{1 \text{ si el producto } p \text{ utiliza la ruta } r; 0 \text{ en c.c.}\}$

El objetivo de nuestro modelo será maximizar la cantidad de pedidos ponderados por su prioridad que se pueden fabricar dentro de una semana.

El modelo propuesto es el siguiente:

$$\text{Maximizar } \sum_{p=1}^{18} W_p * Y_p$$

s.a:

[1]

$$\sum_{k=1}^6 S_{jk} * \epsilon_{jk} \leq C_j \quad j = 1..9$$

[2]

$$\sum_{j=1}^9 m_j * \epsilon_{jk} \leq A_k \quad k = 1..6$$

[3]

$$\sum_{p=1}^{18} \sum_{r=1}^2 D_p * T_{prjk} * \theta_{pr} \leq m_j * L_k * \epsilon_{jk} \quad k = 1..6; j = 1..9$$

[4]

$$\sum_{r=1}^2 \theta_{pr} = Y_p \quad p = 1..18$$

[5]

$$\sum_{p=1}^{18} \sum_{r=1}^2 \sum_{k=1}^6 Dp * Tprjk * \theta_{pr} + \sum_{p=1}^{18} \sum_{r=1}^2 \gamma_{pr} * ST_{prj} * = mj * u_j \quad j = 1..9$$

[6]

$$u_{med} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^9 u_j$$

[7]

$$(1 - \alpha) * u_{med} \leq u_j \leq (1 + \alpha) * u_{med} \quad j = 1..2$$

[8]

$$\theta_{pr} \leq \gamma_{pr} \leq M * \theta_{pr} \quad p = 1..18; r = 1..2$$

[9]

$$u_j \leq TD_j \quad j = 1..2$$

$$\theta_{pr} u_j \geq 0; \varepsilon_{jk} \geq 0 \in Z; Y_p, \gamma_{pr} \in B$$

Las restricciones [1] limitan la capacidad de copias en el almacén de herramientas, mientras que las restricciones [2] limitan el número de copias de cada herramienta.

Las restricciones [3] establecen que el tiempo de utilización de un tipo de herramienta  $k$  en una estación  $j$ , no supera su vida útil.

Las restricciones [4] imponen la unidad en la suma de las proporciones de los pedidos realizados por diferentes rutas.

Las restricciones [5] calculan la carga de trabajo que tendrá cada máquina de las diferentes estaciones. La carga de trabajo de cada máquina en cada estación es igual a la suma de tiempos de procesado que depende de las demandas y la suma del tiempo de set up de la máquina  $j$  cuando el producto  $p$  pasa por la ruta  $r$  si es que la máquina  $j$  está dentro de la ruta  $r$ .

Las restricciones [6] y [7] hacen cumplir que el desequilibrio máximo de las cargas de las estaciones no supere un porcentaje ( $\alpha$ ) de la carga media de las mismas. Estas restricciones se pueden considerar como una segunda función objetivo, de forma que se intenta mantener un equilibrado o balanceado de las cargas en todas las estaciones, permitiendo así que todas acaben aproximadamente a la vez y así favorecer una reducción del tiempo de finalización. El valor de  $\alpha$  se considera un parámetro a ajustar.



La restricción [8] valida que cada vez que una proporción del producto  $p$  pase por la ruta  $r$  asigna un valor de 1 a  $\gamma$ , o de 0 en caso contrario. Si el valor es 1 entonces suma a la carga de la estación su valor del tiempo de Set-Up.

Por último las restricciones [9] limitan la carga de cada máquina, haciendo que esta no supere el tiempo disponible por cada máquina  $j$ .

Las variables son  $\Theta_{pr}$  y  $U_j$  son continuas, mientras que las variables  $\zeta_{jk}$  son enteras y las variables  $Y_p$  y  $\gamma_{pr}$  son binarias.

# 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

## 6.1 INTRODUCCIÓN

Para presentar el desempeño del modelo propuesto en el capítulo anterior se realizaron distintos experimentos divididos en escenarios de modo que se aprecie de mejor forma la evolución y funcionalidad del modelo, la estructura es la siguiente:

- I. Escenario 0: Este escenario es el de partida, en el cual se muestra cómo se realiza la carga de máquinas actualmente en donde solo se considera una ruta de producción por cada producto. Los cálculos son realizados en una hoja Excel.
- II. Escenario 1: Los mismos datos que se utilizan en Excel para la planeación de la producción se introducen en LINGO, añadiendo una serie de pedidos más, con su demanda y su prioridad, de modo que validemos que el Modelo funciona adecuadamente y seleccionará únicamente los productos que es capaz de fabricar en función de sus demandas, tiempos y prioridad.
- III. Escenario 2: Una vez que se ha validado el modelo, se realiza la experimentación incluyendo una ruta alternativa de producción para cada producto y se muestran los resultados que se arrojan.
- IV. Escenarios adicionales: Estos escenarios se generan para realizar un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros decisivos del modelo. Se analizará cuáles de ellos tienen mayor impacto en el modelo y como afecta a los resultados si alguno de ellos cambia.

El modelo del escenario #2 con rutas alternativas cuenta con un total de 108 variables Enteras y 110 variables Binarias y con un total de 306 restricciones.

Para resolver el modelo se utilizó el programa Lingo en su Versión 10.0, el cual utiliza un algoritmo de Branch and Bound para resolver el problema.

El ordenador utilizado para implementar el modelo tiene un procesador Intel®Core™i3 3227U CPU @1.90GHz. El código desarrollado en LINGO se podrá observar en el Anexo 1.

## 6.2 PLAN DE PRODUCCIÓN REAL SIN RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 0)

El escenario #0 refleja el plan de producción semanal correspondiente a los datos originales pero

usando únicamente la Ruta #1. En el sistema real no se plantean rutas alternativas por la dificultad que origina su cálculo. Por ello, cada referencia (tipo de electrodo) sigue siempre el mismo orden de fabricación. Esto es muy frecuente en sistemas de fabricación tipo taller donde no existe un sistema de planificación y control avanzado.

La selección de los 18 pedidos con la Ruta #1 da lugar a las siguientes tablas 6.1 y 6.2 de resultados calculadas a través de una hoja de cálculo.

Estación (j)	Carga (u)	Limite (u)	Diferencia
1	2192,00	2200	8,00
2	2241,60	2290	48,40
3	2260,00	2290	30,00
4	2143,00	2200	57,00
5	2194,00	2200	6,00
6	2194,00	2200	6,00
7	2177,00	2200	23,00
8	1880,00	1880	20,00
9	1479,50	1585	105,50
<b>U (media)</b>	1479,79	2116,11	33,8
<b>U (total)</b>	18761,10	19045,00	303,90

Tabla 6. 1 Carga de las diferentes estaciones (Esc. 0)

Herramienta (k)	Vida útil (Lk)	Copias disponibles	Tiempo total disponible	Copias utilizadas	Tiempo real de uso	Porcentaje Uso
1	125	11	1375,00	11	1275,00	92,7%
2	300	12	3600,00	8	2184,00	66,2%
3	325	14	4550,00	12	3433,50	81,3%
4	150	18	2700,00	12	1629,80	63,9%
5	350	13	4550,00	12	3298,80	85,7%

6	200	22	4400,00	10	1875,00	44,6%
---	-----	----	---------	----	---------	-------

Tabla 6. 2 Uso de las herramientas (Esc. 0)

Se puede comprobar de las tablas anteriores que se cumplen las limitaciones de Carga Disponible en cada máquina, de Número Disponible y de Vida Útil de cada herramienta.

El valor obtenido del desequilibrio máximo (ALFA) entre cargas de máquinas es de  $\alpha=0.875$ .

### 6.3 SOLUCIÓN DEL MODELO SIN RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 1)

El escenario #1 pretende validar el modelo desarrollado en el capítulo 5 a través de su comparación con el escenario real. Para ello se utilizan los datos del Escenario #0 con únicamente las Rutas #1 y se resuelve mediante Lingo.

Los valores de las variables coinciden con los obtenidos en las tablas 6.1 y 6.2 anteriores. El valor de la función objetivo es de  $Y=1$ , con todos los  $Y_p=1$  y los  $\theta_{pl}=1$ , es decir, se realizan todos los pedidos. Los valores de  $u_j$  coinciden con los de la tabla 6.1. Los valores de  $\xi_{jk}$  coinciden con los de la tabla 6.2.

### 6.4 SOLUCIÓN DEL MODELO CON RUTAS ALTERNATIVAS (ESCENARIO 2)

Una vez validado que el modelo funciona acorde a la realidad, se introdujeron en el programa los datos de rutas alternativas indicados en el capítulo 5.

Los datos se corresponden a los pedidos fabricados a lo largo de una semana de producción, siendo esta semana en la que se registró la mayor cantidad de pedidos en un período de 12 semanas. Con la implementación del modelo, se pretende lograr una carga de máquinas más óptima y equilibrada, distribuyéndola a lo largo de las diferentes estaciones y rutas posibles.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos.

#### 6.4.1 SELECCIÓN DE PEDIDOS Y RUTAS

Los resultados del modelo se pueden observar en la tabla 6.2.

Producto (p)	Selección (Yp)	$\theta_{p1}$	$\theta_{p2}$
1	1	0,98	0,2
2	1	1	0
3	1	0,875	0,125
4	1	1	0
5	1	0	1
6	1	0,78	0,22
7	1	0	1
8	1	0,42	0,58
9	1	0,82	0,17
10	1	0	1
11	1	0,09	0,91
12	1	1	0
13	1	0,02	0,98
14	1	0,65	0,35
15	1	0	1
16	1	0,97	0,03
17	1	0,45	0,55
18	1	0	1

**Tabla 6. 3 Selección de pedidos y proporción de rutas prueba inicial (Esc. 2)**

De la tabla se puede observar que con la aplicación del modelo se fabrican los 18 pedidos y que en 10 de ellos se utiliza una mezcla de rutas. En el Anexo 2 se pueden observar los resultados generados en un fichero llamado “FANDHER.txt”.

El tiempo de resolución del modelo fue de 00:00:19 segundos.

## **6.4.2 CARGA DE MÁQUINAS**

La carga de máquinas se muestra en la tabla 6.4.

Estación (j)	Carga (u)	Limite (u)	Diferencia
1	1.935,92	2200	264,08
2	1.946,71	2290	343,29
3	1.603,00	2290	687,00
4	1.800,64	2200	399,36
5	1.498,79	2200	701,21
6	1.946,71	2200	253,29
7	1.775,40	2200	424,60
8	1.498,79	1880	381,21
9	1.498,79	1585	86,21
<b>U (media)</b>	1.722,75	2.116,11	393,36
<b>U (total)</b>	15.504,76	19.045,00	3.545,24

Tabla 6. 4 Carga de las diferentes estaciones (Esc. 2)

Se hicieron un total de 4 pruebas con distintos valores de  $\alpha$  (ALFA) y se determinó que con un valor de  $\alpha \geq 0,15$  el modelo seleccionaba los 18 pedidos. Con valores inferiores a este el modelo tiende a un mayor equilibrio de cargas pero no seleccionan todos los pedidos debido a que las máquinas que se utilizan en las rutas disponibles lo impiden.

A través de esta tabla se observa la distribución de las cargas en las diferentes estaciones así como como la diferencia entre la carga asignada y el tiempo disponible de cada una de las máquinas.

El equilibrio de la carga de máquinas presenta una desviación estándar de 188,39 minutos

### 6.4.3 VIDA ÚTIL DE LAS HERRAMIENTAS

A las herramientas se les asignó una vida útil diferente en función de su tamaño y el material del que están fabricadas.

En la tabla 6.5 se presentan los resultados de las copias necesarias y el tiempo de uso de las herramientas.

Herramienta (k)	Vida útil (Lk)	Copias disponibles	Tiempo total disponible	Copias utilizadas	Tiempo real de uso	Porcentaje Uso
1	125	11	1375,00	11	1276,93	92,9%
2	300	12	3600,00	12	2918,13	81,1%

3	325	14	4550,00	12	2738,90	60,2%
4	150	18	2700,00	16	2264,49	83,9%
5	350	13	4550,00	8	2876,52	63,2%
6	200	22	4400,00	12	2214,77	50,3%

**Tabla 6. 5** Uso de las herramientas (Esc. 2)

Tanto la selección de una ruta u otra, como la selección o no de un pedido está también limitado por la vida útil de las herramientas. Si la vida útil de una herramienta no es suficiente para realizar el pedido completo por una ruta o su combinación de rutas, el pedido no podría ser seleccionado para su fabricación, aunque fueran tan solo unos minutos los que hicieran falta, ya que la premisa es que una vez que se inicia a fabricar un pedido, deberá de realizarse por completo.

Entonces, si la vida útil de las herramientas no se puede cambiar, debido a restricciones tecnológicas o de materiales por ejemplo, se debería considerar la adquisición de más copias si se desea ser capaz de fabricar más pedidos dentro del horizonte de planificación.

El modelo al final nos permite conocer el uso de cada herramienta en cada estación en particular, por lo que puede conocerse según la ruta seleccionada, cómo influye la disponibilidad de herramientas.

A partir de los datos presentados se deduce que la vida útil de las herramientas está por encima de su utilización para todos los pedidos a fabricar, por lo que dentro de ese período tenemos vida útil suficiente de las herramientas para algún otro pedido si este se decidiera fabricar.

## **6.5 COMPARATIVA SITUACIÓN ACTUAL (UNA RUTA) VS. MODELO (CON RUTAS ALTERNATIVAS)**

Una vez obtenidos estos resultados se comparan con lo que anteriormente se había logrado a través de una única ruta de fabricación.

Los resultados de esta comparación se muestran a continuación.

### **6.5.1 SITUACIÓN ACTUAL.**

En la situación actual, como se mencionó, todos los productos se fabrican a partir de una única ruta. La segunda ruta para cada producto se desarrolló a partir de los datos que se tienen de los productos y las máquinas y realizando pruebas en los diferentes productos. La información de los datos reales de producción de la semana que se ha tomado como referencia se encuentra en la Tabla 6.6.

Número de Electrodo	Día de fabricación	Código Electrodo	Cantidad producida	Tiempo Set-Up	Tiempo Unitario operación	Tiempo de operación total	Tiempo disponible (todo el taller)	Tiempo perdido
1	06-abr	138310	15	13	78,5	2446,5	19045	283,9
	07-abr		16					
2	06-abr	32672	20	6	12,0	426,0		
	07-abr		15					
3	07-abr	173283	50	6	20,0	1006,0		
4	08-abr	75120	10	5	40,0	405,0		
5	08-abr	31893	6	16	67,0	686,0		
	10-abr		4					
6	06-abr	74667	31	8	54,5	2733,0		
	08-abr		19					
7	07-abr	188619	7	11	50,0	511,0		
	08-abr		3					
8	06-abr	74469	16	8	49,0	1772,0		
	10-abr		20					
9	08-abr	159462	56	8	39,0	2192,0		
10	07-abr	153292	30	10	26,7	811,0		
11	09-abr	159463	28	14	53,0	1498,0		
12	08-abr	108212	14	16	40,0	576,0		
13	09-abr	102105	7	15	74,0	533,0		
14	10-abr	102100	36	19	59,0	2143,0		
15	10-abr	159490	8	10	15,6	134,8		
16	10-abr	122316	12	5	38,25	464,0		
17	09-abr	74980	5	19	55,0	294,0		
18	10-abr	107459	10	4	12,58	129,8		
<b>TOTAL</b>			<b>438</b>	<b>193</b>	<b>784,13</b>	<b>18761,1</b>	<b>19045</b>	<b>283,9</b>

Tabla 6. 6 Producción semanal de Electrodos

En toda la semana se han fabricado 438 electrodos, de los cuales, algunos se han fabricado en días



diferentes. El tiempo empleado para su fabricación por la única ruta disponible (Ruta #1) fue de 18.761,10 minutos.

Se puede observar que se tiene una pérdida de tiempo en la semana de 283,9 minutos, que representa el 9,63% del tiempo, esto es debido a diversos factores que no son objeto del presente trabajo de fin de máster pero que podría deberse entre otras cosas al factor fatiga, a improductividad por parte de la plantilla, paros inesperados de máquina, roturas de stock etc.

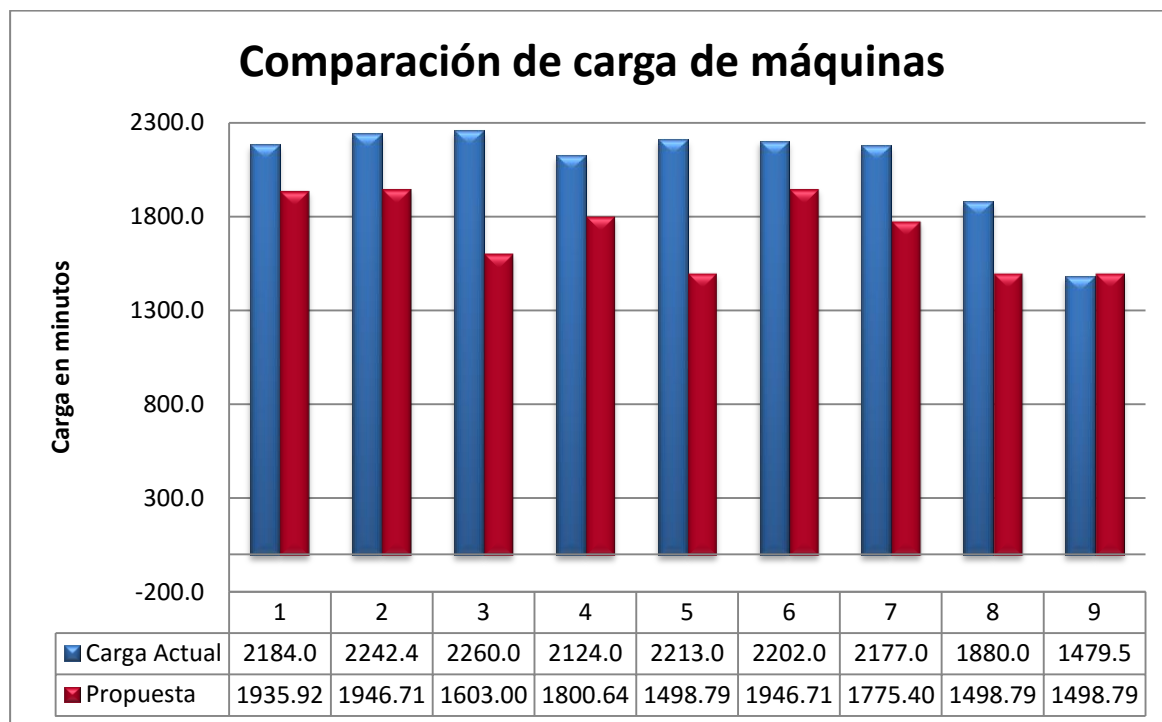
Como se comprobó en el escenario #1, si se realiza la planificación de la producción considerando únicamente la ruta 1 no es posible incorporar más pedidos o satisfacer una demanda mayor de estos productos.

### 6.5.2 COMPARACIÓN EN LA CARGA DE MÁQUINAS.

En la tabla 6.7 se muestra una comparativa de las cargas, en la primera columna se muestra la carga de máquinas que actualmente se tiene utilizando únicamente 1 Ruta de fabricación. En la segunda columna se muestra la carga de máquinas necesaria utilizando rutas alternativas.

(j)	1 ruta	2 rutas	Diferencia	Mejora
1	2184,0	1935,92	248,08	11,36%
2	2242,4	1946,71	295,69	13,19%
3	2260,0	1603,00	657,00	29,07%
4	2124,0	1800,64	323,36	15,22%
5	2213,0	1498,79	714,21	32,27%
6	2202,0	1946,71	255,29	11,59%
7	2177,0	1775,40	401,60	18,45%
8	1880,0	1498,79	381,21	20,28%
9	1479,5	1498,79	-19,29	-1,30%
<b>Total</b>	<b>18.761,9</b>	<b>15.504,76</b>	<b>3.257,13</b>	<b>17,36%</b>

Tabla 6. 7 Carga de máquinas actual vs. Modelo propuesto



**Gráfico 6. 1Carga de máquina actual vs. modelo propuesto**

La diferencia que se observa entre la forma actual de cargar las máquinas y la propuesta por el modelo supone una mejora del **17,36%** en el tiempo necesario para fabricar los mismos **18** pedidos.

Esto quiere decir que la utilización de una segunda ruta alternativa por cada producto provoca un reequilibrio de las cargas y como resultado puede lograr que lo que normalmente tardaba en fabricarse durante una semana entera es posible hacerlo en menos tiempo, dando lugar a que se puedan tomar decisiones para aprovechar dicha capacidad extra que se ha ganado.

A continuación se realizarán experimentaciones variando diferentes parámetros del modelo para comprobar cómo cambian los resultados a medida que modificamos estos valores.

## 6.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para realizar un análisis de sensibilidad, se hará la modificación de datos de entrada dejando el resto constante sobre el Escenario #2 con rutas alternativas. Es posible hacer múltiples combinaciones de los parámetros y datos a modificar, pero eso daría lugar a su vez a múltiples escenarios distintos. Se optó por realizarlo con las siguientes modificaciones respecto al modelo de 18 pedidos y rutas alternativas (Escenario #2): aumento de pedidos, aumento de las demandas con mismos pedidos, aumento de los valores de ALFA y aumento de la cantidad disponible de cada herramienta.

### 6.6.1 AUMENTO DE PEDIDOS A FABRICAR

Una vez comprobado que aplicando el modelo propuesto es posible realizar los 18 pedidos en un menor tiempo e incluso utilizando una menor cantidad de herramientas para algunos casos, se probó incluir en la planificación 4 pedidos extra (del 19 al 22) que anteriormente no había sido posible fabricar a través de 1 ruta. Para esta primera prueba todos los parámetros permanecen constantes (alfa, copias de herramientas, vida útil, demandas, etc.)

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Pedidos a Fabricar: 20 de 22
- Función objetivo:  $Y=1,01$  de 1,02 posible.

#### Pedidos a fabricar:

Mezcla de rutas					
		18 PEDIDOS		22 PEDIDOS	
Producto (p)	Selección (Yp)	$\theta_{p1}$	$\theta_{p2}$	$\theta_{p1}$	$\theta_{p2}$
1	1	0.98	0.2	1	0
2	1	1	0	0.82	0.18
3	1	0.875	0.125	0.875	0.125
4	1	1	0	1	0
5	1	0	1	0.046	0.954
6	1	0.78	0.22	0.85	0.15
7	1	0	1	0	1
8	1	0.42	0.58	0.38	0.62
9	1	0.82	0.17	0.68	0.32
10	1	0	1	0.16	0.84
11	1	0.09	0.91	0.11	0.89
12	1	1	0	0	1
13	1	0.02	0.98	0.61	0.39

14	1	0.65	0.35	0.66	0.34
15	1	0	1	1	0
16	1	0.97	0.03	0.89	0.11
17	1	0.45	0.55	0.45	0.55
18	1	0	1	1	0
19		-	-	0	0
20	1	-	-	1	0
21	1	-	-	0	1
22		-	-	0	0

Tabla 6. 8 Producción semanal con 22 pedidos disponibles y rutas alternativas

Los 2 pedidos que no han sido seleccionados para su fabricación (ver Tabla 6.8) son el 19 y el 22, puesto que la combinación entre demanda y tiempo de fabricación superan la capacidad disponible en tiempo de las máquinas por las cuales se fabrican, incluso si estos se fabricaran en su totalidad por la ruta que menos tiempo de proceso requiere.

En este caso fue posible fabricar 20 de los 22 pedidos incluidos dentro de la planificación. La carga de máquinas que se obtiene en un escenario con los mismos parámetros de entrada se puede apreciar en el Gráfico 6.2.

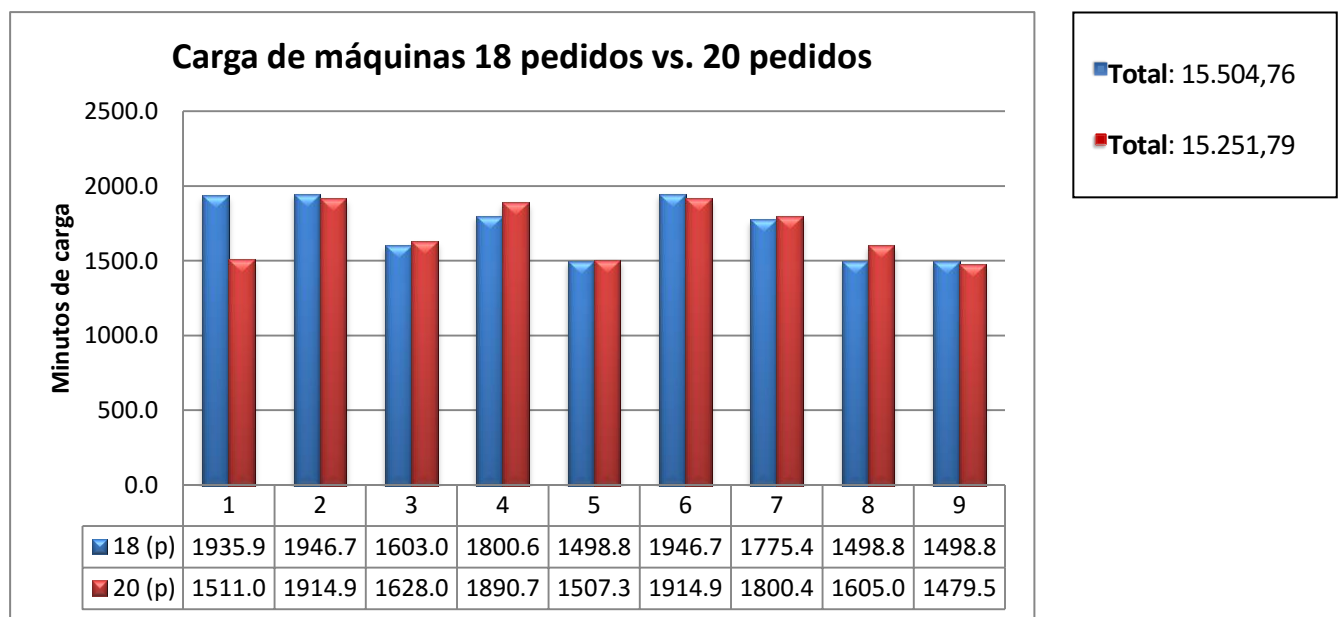
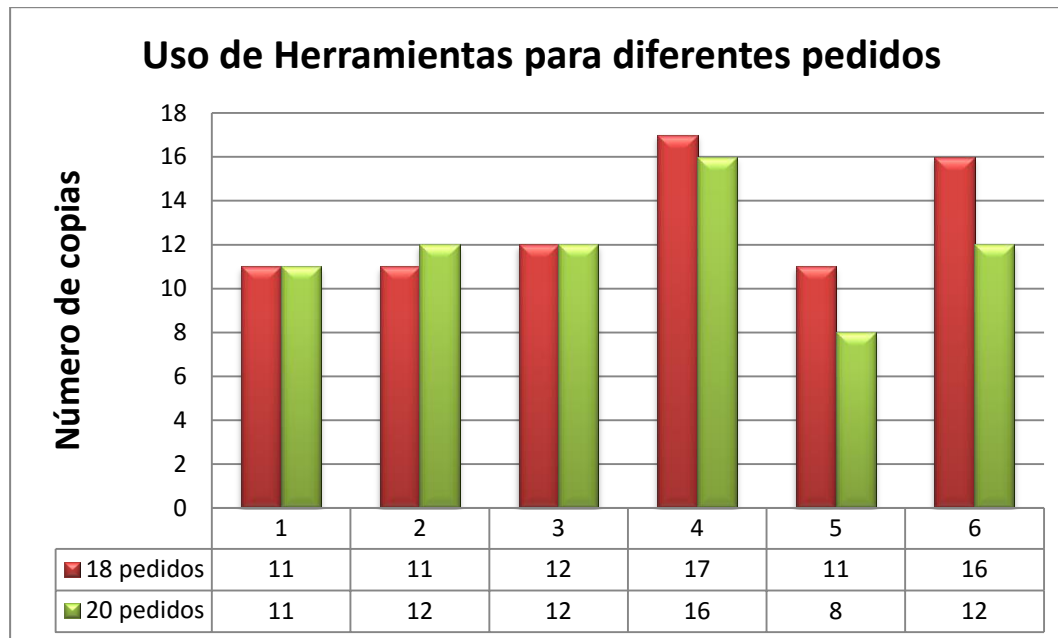


Gráfico 6. 2 Carga de máquina 18 pedidos vs. 20 pedidos

Se observa que la carga de máquina es incluso mejor que cuando se realizaban 18 pedidos, puesto

que la inclusión de estos pedidos nuevos da lugar a una nueva configuración de rutas de fabricación. Esto supone una reducción de tiempo de un 2%. Hay que recordar que el objetivo principal es maximizar el número de pedidos ponderado (Y) y no el tiempo total.



**Gráfico 6.3** Uso de herramientas 18 pedidos vs. 20 pedidos

Para esta experimentación se observa que en la fabricación de 2 pedidos extra se ha reducido notablemente el uso de las herramientas #5 y #6; esto es debido a que la inclusión de 2 pedidos extra obliga a que se modifique la proporción de las rutas de los otros pedidos y por lo tanto los tiempos y las estaciones utilizadas sean diferentes.

Se realizó una prueba incrementando el valor de prioridad del pedido 19 igualándolo al valor del pedido con mayor prioridad dando como resultado que el modelo seleccionó el pedido 19 para su fabricación pero teniendo que dejar fuera a los pedidos 12, 20 y 22 lo que da como resultado un  $Y=1,058$  el cual es inferior al obtenido anteriormente y por lo tanto una solución peor.

### **6.6.2 Aumento en la demanda del pedido inicial.**

Otra prueba realizada fue el probar un incremento en la demanda para los mismos 18 pedidos que se fabrican en una semana del escenario #2. Se incrementó la demanda en un 17%, se tomó este número ya que es el porcentaje en el cual se redujo el tiempo necesario para fabricar 18 pedidos con el modelo propuesto.

La demanda queda reflejada en la tabla 6.9.

## Demanda

<b>D</b>	37	41	59	12	12	59	12	43	66	36	33	17	9	43	10	15	6	12
<b>w</b>	0.07	0.10	0.06	0.05	0.09	0.05	0.04	0.05	0.08	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.06

**Tabla 6.9 Nuevas Demandas de pedidos (incremento del 17%)**

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

### Selección de pedidos:

En este escenario no han sido seleccionados los pedidos 10 y 11, fundamentalmente porque las herramientas se usan al máximo, dejando fuera el pedido #10 porque tiene una prioridad muy baja y el pedido #11 porque tiene un tiempo de fabricación muy alto (puede consultarse en el capítulo 5) .

### Herramientas:

<b>k</b>	<b>Htas Disp</b>	<b>Vida útil disp</b>	<b>Htas Usadas</b>
1	11	1375	11
2	12	3600	12
3	14	4550	14
4	18	2700	18
5	13	4550	13
6	22	4400	13

**Tabla 6.10 Uso de herramientas con Nuevas Demandas de pedidos (incremento del 17%)**

Salvo la herramienta #6, de todas las herramientas se usa el 100% de las copias (ver Tabla 6.10), por lo que no quedan copias disponibles para fabricar los pedidos faltantes.

En esta prueba queda claro que la cantidad de copias disponibles y su tiempo de vida útil limitan la producción de la totalidad de los pedidos, ya que la carga de máquinas total es inferior al tiempo total disponible por cada máquina como se puede ver en el gráfico 6.4.

El tener rutas alternativas en donde se utilizan máquinas diferentes con tiempos de procesamiento distinto, brinda a los sistemas de fabricación una mayor flexibilidad al momento de cargar las máquinas, ya que existen muchas combinaciones distintas posibles que pueden favorecer a un menor uso de tiempo. Sin embargo, como hemos visto en esta última prueba, algunos recursos, como son las herramientas disponibles suponen una limitación al sistema en cuanto a la posibilidad de fabricar

los pedidos necesarios.

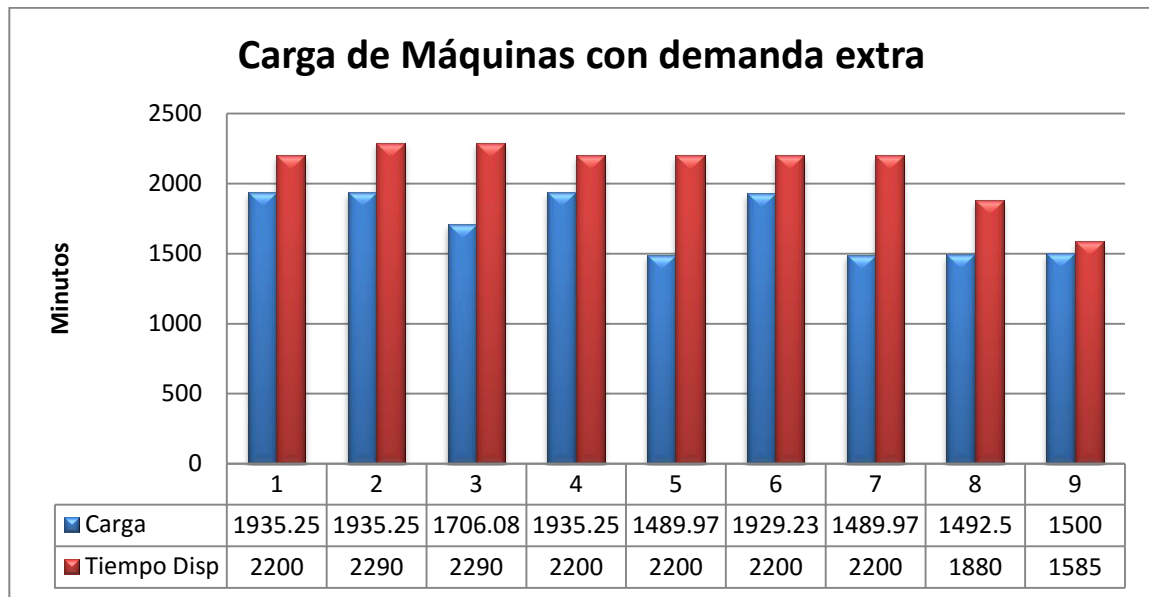


Gráfico 6. 4Carga de máquinas para demanda extra

### 6.6.3 MODIFICACIÓN DEL VALOR DE ALFA.

Dado que el valor de ALFA ( $\alpha$ ) mientras más pequeño sea, mayor será el equilibrio total del sistema, esto hace que la proporción de las rutas utilizadas para los distintos pedidos varíe de modo que la carga que se asigne a las máquinas en su conjunto, tenga la menor dispersión posible.

Se realizó una prueba incrementando el valor de ALFA de 0,13 que tenía originalmente a un valor  $\alpha=0,9$  de modo que la restricción se relajara, los resultados obtenidos son los siguientes:

- Han sido igualmente seleccionados para su fabricación el total de los 18 pedidos como era de esperar.
- La diferencia de la carga de máquinas puede ver en el Gráfico 6.5.

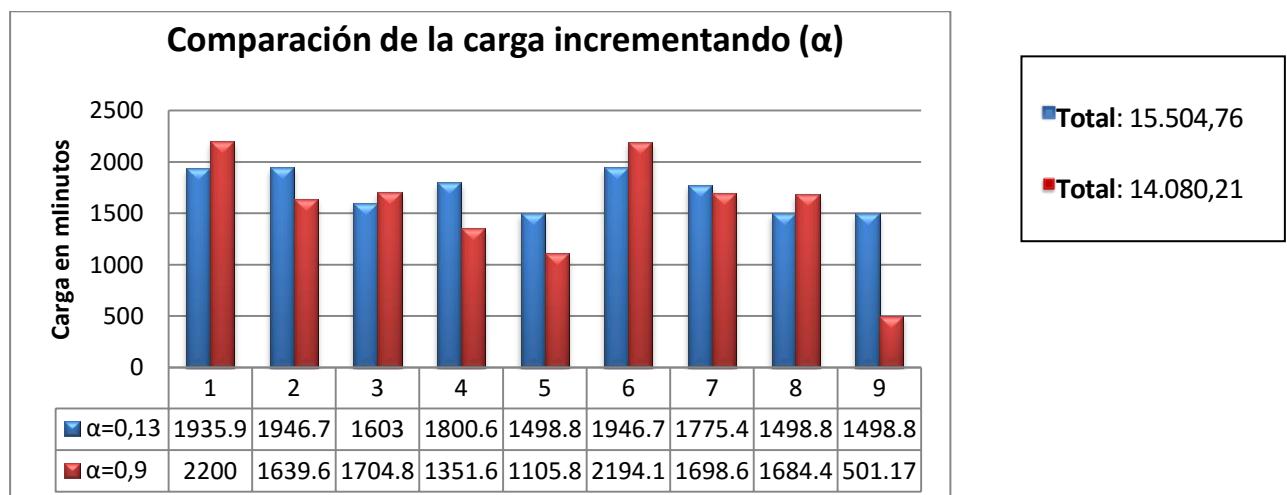


Gráfico 6. 5 Carga de máquina a distintos valores Alfa

Al incrementar el valor de ( $\alpha$ ) se incrementa también el desequilibrio del sistema, la carga general del sistema es ahora menor, lo cual podría parecer un mejor resultado, sin embargo la diferencia entre la estación con mayor carga (2200 minutos) y la estación con menor carga (501,17 minutos) es de 1.698,83 minutos que sería el tiempo que está máquina permanecería ociosa. La desviación estándar se incrementa ahora a 499,38 minutos. Es importante hacer notar que la solución del escenario #2 es también óptima y por tanto alternativa para este escenario.

- Las copias utilizadas y el tiempo empleado por cada herramienta se puede ver en el Gráfico 6.6.

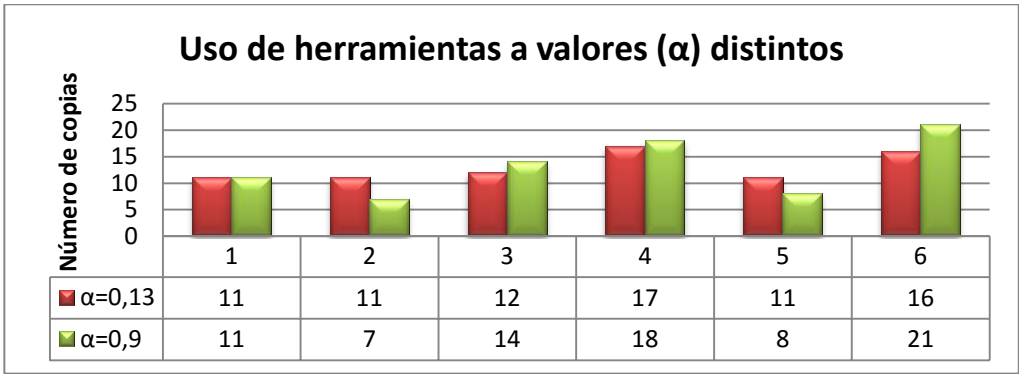


Gráfico 6. 6 Uso de herramientas a valores ( $\alpha$ ) distintos

Para valores de ALFA distintos, el total de herramientas utilizadas en la fabricación de pedidos es de 79 copias en ambos casos, sin embargo no se consumen la misma cantidad de herramientas del mismo tipo en el 83% de los casos. Este sería un factor importante si se decidiese hacer una carga no equilibrada de máquinas en un escenario con más pedidos o mayor demanda de los pedidos actuales

**6.6.4 MODIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE HERRAMIENTAS.**

La última prueba realizada dentro del análisis de sensibilidad fue la modificación de la cantidad de herramientas. Se reducirá la cantidad de herramientas de cada tipo en un 20%, según se muestra en la Tabla 6.11.

Copias originales	11	12	14	18	13	22
Copias menos 20%	8	9	11	14	10	17

Tabla 6. 11 Cantidad de herramientas disponibles (decremento del 20%)

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Selección de pedidos:

Se seleccionaron en este escenario 17 pedidos, dejando fuera el pedido #10.

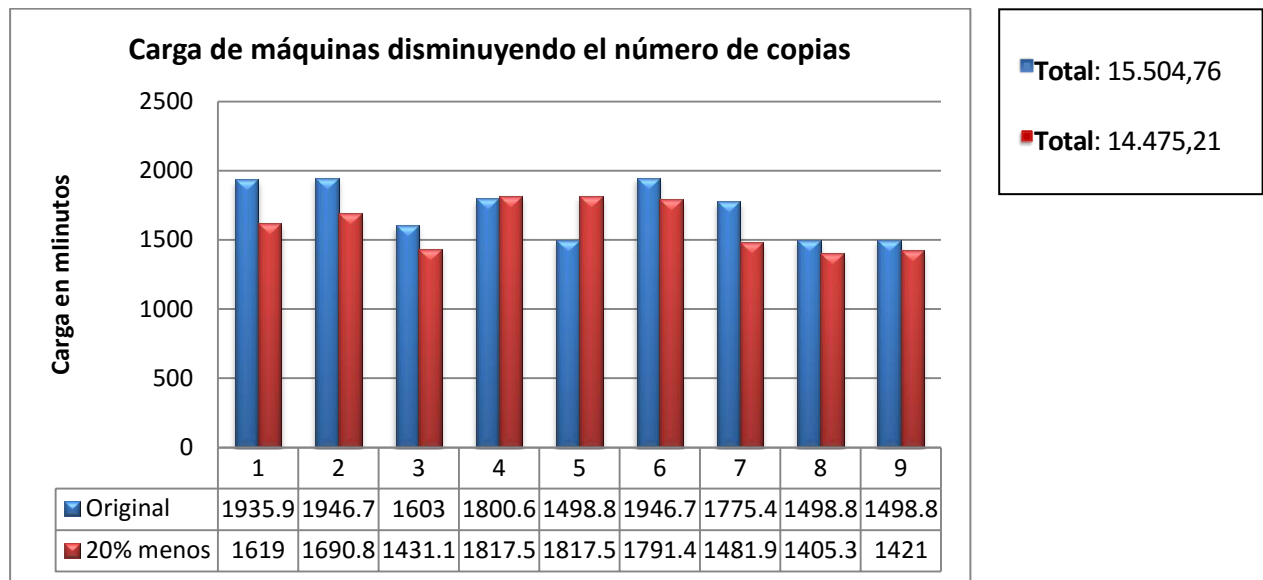


Uso de herramientas:

Para este escenario se utilizó el 100% de las copias disponibles.

Carga de Máquinas:

La carga de máquinas se puede observar en el gráfico 6.7



**Gráfico 6. 7 Carga de máquina con menor cantidad de herramientas**

La carga de máquinas en este escenario es evidentemente menor puesto que un pedido no ha sido seleccionado para su fabricación. El pedido #10 ha quedado fuera de selección ya que al tener una prioridad baja y habiéndose utilizado la totalidad de herramientas disponibles para la fabricación del resto de pedidos ha sido desechado por el modelo.

# 7. CONCLUSIONES

---

## 7.1 CONCLUSIONES

La optimización de cualquier tipo de proceso que genera valor se ha vuelto una necesidad dentro de todas las organizaciones. La optimización es una palabra en boca de la gran mayoría de las personas que están involucradas con el desarrollo, ejecución o seguimiento de operaciones; sin embargo, para que esto se desarrolle de manera eficiente, es fundamental realizar investigación.

La investigación sobre el desarrollo y la aplicación de modelos de programación matemática es necesaria si pretendemos resolver los problemas de optimización. Tradicionalmente este tipo de enfoques no se suelen utilizar dentro de la industria, donde la mayoría de las organizaciones utilizan métodos de prueba y error y una programación muy básica a través de hojas de cálculo en paquetes como Microsoft Excel®.

A través de este trabajo se han mostrado diferentes enfoques en la industria para resolver una problemática muy concreta sobre la carga de máquinas y la selección de productos a fabricar. Si bien muchos de estos enfoques se encuentran únicamente en el campo de la investigación, la intención de este trabajo ha sido analizar esos estudios y trasladarlos al campo práctico. Entendiendo que las condiciones no eran iguales, se adaptó la metodología a un escenario real y se realizaron las modificaciones pertinentes.

Como se comentó desde el principio, la intención de desarrollar un modelo matemático de optimización era la de facilitar el trabajo de la persona encargada de la gestión del taller de trabajo proporcionándole una herramienta capaz de realizar en poco tiempo las actividades de programación de la producción que consumían gran parte de su tiempo diario.

Con la experimentación realizada, se ha validado el modelo matemático desarrollado sobre el sistema real y se ha ampliado su uso para la incorporación de rutas alternativas. Con dicha flexibilidad se permite aumentar los pedidos a fabricar en un horizonte de planificación semanal manteniendo un equilibrado de carga en las estaciones de trabajo y utilizando el número disponible de herramientas.

Esta herramienta metodológica le servirá al gestor del taller para tomar decisiones, ofreciendo una solución óptima al problema en un tiempo rápido de computación y a partir de ahí podrá ser capaz de gestionarlo conforme estime conveniente. El modelo puede ser ejecutado tantas veces estime oportuno, actualizando los datos de entrada según las condiciones del taller.

## 7.2 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

El desarrollo de este modelo tal y como se ha presentado no quedaría integrado dentro de una aplicación informática de la empresa, puesto que solo muestra los resultados en un fichero texto a partir de ciertos datos de entrada convenientemente preparados.

El siguiente paso debería ser el desarrollo de una interfaz gráfica que incorpore el modelo en la programación semanal de la empresa, de modo que el gestor la pueda utilizar de forma fácil e intuitiva; de lo contrario puede al final resultarle más complicado y no justificaría la realización de este trabajo.

El trabajo hasta el momento únicamente indica cual sería una óptima distribución del trabajo y carga de máquinas a lo largo de una semana. Sin embargo no indica en qué orden deberán ser ordenados los trabajos en cada una de las máquinas. Dentro de la literatura este problema se conoce como “Machine Scheduling Problem”. El problema de programar órdenes de trabajo a máquinas se caracteriza por un número virtualmente ilimitado de tipos de problemas (Brucker, 1998) y ha sido abordado en la literatura por un gran número de autores.

Podemos entender el problema de la programación de trabajos en máquinas en un taller mecánico como asignar el tiempo de los recursos que tenemos disponibles para producir buscando la satisfacción de uno o varios requisitos establecidos de forma implícita o explícita. Busca secuenciar, dentro del tiempo disponible, una serie de trabajos que serán procesados por una serie de máquinas, las cuales realizan una operación. El orden que se le asigne a cada uno de los trabajos dependerá de los criterios que se hayan establecido, generalmente siendo estos de carácter económico, y cumpliendo con las restricciones que el mismo proceso nos marca (Chase & Aquilano, 1994).

Una posible línea futura de investigación sería el desarrollo de un programa de secuenciación de trabajos, partiendo de conocer cuál es la carga que tendrá cada una de las máquinas dentro de nuestro horizonte de trabajo.

Por último otra posible línea de trabajo futuro sea la estandarización en la forma que se reciben las solicitudes por parte de los clientes, de modo que el canal y el método de entrada sea el mismo, evitando así tener que re TRABAJAR la información que se recibe, así como disminuir las posibilidades de recibir información errónea o de transmitirla erróneamente al realizar el trabajo.

# 8. REFERENCIAS

---

## 8.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asprova Corporation.* (1994). Retrieved Agosto 26, 2015, from Lean Manufacturing Japan: <http://www.lean-manufacturing-japan.com/scm-terminology/mto-make-to-order.html>
- Toyota.* (2015, 09 11). Retrieved from Toyota Global Site: [http://www.toyota-global.com/company/vision\\_philosophy/toyota\\_production\\_system/just-in-time.html](http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/just-in-time.html)
- A.Prakash, Khilwani, N., Tiwari, M., & Cohen, Y. (2008). Modified Immune Algorithm for Job Selection and Operation Allocation Problem in FMS. *Advanced Engineering Software*, 219-232.
- Autor. (2012). Este es el ejemplo de una cita. *Tesis Doctoral*, 2(13).
- Autor, O. (2001). Otra cita distinta. *revista*, p. 12.
- Bauer, A., Bowden, R., Browne, J., Duggan, J., & Lyons, G. (1991). *Shop Floor control Systems, from design to implementation*. Londres: Chapman & Hall.
- Berrada, M., & Stecke, K. (1986). A branch and bound approach for machine load balancing in Flexible Manufacturing Systems. *Management Science*, 1316.1335.
- Brucker, P. (1998). *Scheduling Algorithms* (Vol. 2). Berlin, Alemania: Springer-Verlag.
- Burbidge, J. (1989). *Production Flow Analysis for planning group technology*. Oxford Science Publications.
- Chan, F., & Swarnkar, R. (2006). Ant Colony Optimization Approach to a fuzzy goal Programming Model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 353-362.
- Chase, R. B., & Aquilano, N. J. (1994). *Dirección y administración de la producción y las operaciones* (Sexta. ed.). (E. M. Peake, Trans.) Wilmington, Delaware, Estados Unidos: Adison-Wesley Iberoamericana.
- Choudhary, A., Tiwari, M., & Harding, J. (2006). Part selection and operation-Machine Assignment in FMS Environment: A Genetic Algorithm Approach with chromosome Differentiation-Based Methodology. "Proceedings of the institution of Mechanical Engineering". *Journal of Engineering Manufacture*, 677-694.
- Companys, R., & Corominas, A. (1993). *Planificación de la capacidad productiva. Organización de la Producción I, Diseño de sistemas de producción*. (Vol. 1). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Cuatrecasas, L. (2000). *Organización de la producción y dirección de operaciones. Sistemas actuales de gestión eficiente y competitiva*. Madrid, Madrid, España: Centro de Estudios Ramón Areces S.A.
- De la Peña Esteban, F. D. (2011). *Dirección de la producción*. Madrid: Centro de estudios financieros.
- Denizel, M., & Sayin, S. (1998). Part-Type selection in flexible manufacturing systems: a bicriteria approach with due dates. *Journal of Operational Research Society*, 49, 659-669.
- Domínguez Machuca, J. A. (1995). *"Dirección de Operaciones" Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*. (M. J. Norte, Ed.) Madrid, España: McGraw Hill/Interamericana de España S.A.U.
- Domínguez Machuca, J. A., Álvarez, M. J., Domínguez, M. Á., García, S., & Ruiz, A. (1998). *"Dirección de Operaciones". Aspectos estratégicos de la producción y servicios*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Eguía Salinas, I. (1996). *Programación y control de la producción en procesos semicontinuos, métodos y algoritmos de resolución*. Sevilla, España.
- Fanjul Peyró, L. (2010). Nuevos algoritmos para el problema de secuenciación de máquinas paralelas no relacionadas y generalización. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

- Ferré Macip, R. (1988). *Diseño industrial por computador*. Madrid: Marcombo.
- Garvin, D. (1994). Planificación Estratégica de la Producción. *Harvard Deusto Business Review*(59), 71-85.
- Garvin, D. A. (1994). Planificación Estratégica de la producción. *Harvard Deusto Bussiness Review*, 59(1).
- Giachino, J., & Weeks, W. (1981). *Técnica y práctica para la soldadura*. Barcelona : Reverté S.A.
- Guerrero, F. (1999). Machine loading and part type selection in Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 1303-1317.
- Guerrero, F., Lozano, S., Larrañeta, J., & Onieva, L. (1999). Asignación de herramientas y carga de máquinas en un sistema de fabricación flexible. Universidad de Sevilla.
- Kim, D., & Yano, C. (1997). Impact of throughput-based objectives and machine grouping decisions on the short-term performance of flexible manufacturing systems. *International Journal of production Research*, 3303-3322.
- Kim, H., Yu, J., Kim, J., Doh, H., Lee, H., & Nam, S. (2008). Loading algorithms for FMS with partially Grouped Unrelated Machines and Additional Tooling Constraints . *The international Journal of advanced manufacturing Tecnology*.
- Kuhn, H. (1995). A Heuristic Algorithm for the Loading Problem in Manufacturing Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 7, 229.254.
- Kumar, P., Singh, N., Tiwari, M., & Shankar, R. (1987). Multicriterion analysis of the loading problem in flexible manufacturing systems using a Min-Max approach. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2(2), 13-20.
- Kumar, V. M., & Chandrashekhra, K. (2012). A hybrid algorithm optimization approach for machine loading problem in flexible manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering International*.
- Larrosa, J., Oliveras, A., & Rodriguez-Carbonell, E. (2015, Mayo 07). *Departament de Ciències de la Computació*. Retrieved Agosto 29, 2015, from Universitat Politècnica de Catalunya: <http://www.cs.upc.edu/~erodri/webpage/cps/theory/lp/milp/slides.pdf>
- Mahapatra, S., & Biswas, S. (2007). Machine Loading in Flexible Manufacturing System: A Swam Optimization Approach. *Eight International Conference on Oper. & Quant. Management*, (pp. 621-628).
- Mahmudy, W. F. (2015). Optimization of part type selection and machine loading problems in flexible manufacturing systems usinf variable neighborhood search. *International Journal of computer Science*.
- Mahmudy, W., Lee H., L. S., & Romeo, M. M. (2013). Modeling and Optimization of Part Type Selection and Loading Problem in Flexible Manufacturing System Usin Real Codee Genetic Algorithms. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 7(4), 251-260.
- Mgwatu, M. (2011). Interactive Decisions of Part Selection, Machine Loading, Machining Optimisation and Part Scheduling Problems for FMS. *International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies*, 93-109.
- Mukhopadhyay, S., Midha, S., & Muralikrishna, V. (1992). A heuristic procedure for loading problems in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 2213-2228.
- Nanvala, H., & Awari, G. (2011). Aproaches for solving the machine loading problem in FMS: A review. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(2), 64-73.
- Pinedo, M. (1995). *"Scheduling". Theory, Algorithms and Systems*. New Jersey: Pentice-Hall.
- Ponnambalam, S., & Kiat, L. (2008). Solving Machine Loading Problem in Flexible Manufacturing Systems Using Particle Swarm Optimization. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 14-19.
- Powell, N. (1970). *Production Planning, Scheduling, and Inventory Control. A Text and Cases* (Vol. First Edition). Toronto, Canada: The MacMilland Company.

- S, Lozano, S., Guerrero, F., Eguía, I., & Onieva, L. (1999). Cell design and loading in the presence of alternative routing. *International Journal of Production Research*, 37(14), 3289-3304.
- Salkin, H. M., & Saha, J. (1975). *Studies in Linear Programming* (Vol. 2). (B. V. Dean, Ed.) Amsterdam, Holanda: North-Holland Publishing Company.
- Santos García, J. (2007). *Organización de la producción II. Planificación de procesos productivos*. (5 ed.). San Sebastián, Gipuzkoa, España: Unicopia C.B.
- Sawik, T. (2004). Loading and Scheduling of a flexible assembly system by mixed integer programming. *European Journal of Operational Research*, 1-19.
- Seok Shin, K., Park, J., & Keun Kim, Y. (2011). Multiobjective FMS Process Planning with various Flexibilities Using a Symbiotic Evolutionary Algorithm. *Computers and Operations Research*, 26(4), 702-712.
- Shanker, K., & Srinivasulu, A. (1989). Some solutions methodologies for loading problems in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 1019-1034.
- Sinriech, D., & Meir, A. (1998). Process selection and tool assignment in automated cellular manufacturing using Genetic Algorithm. *Annals of Operations Research*, 51-78.
- Stecke, K. (1983). Formulation and solution of non-linear integer production planning problem for flexible manufacturing system. *Management Science*, 29(3), 273-288.
- Stecke, K. (1985). Design, planning, scheduling, and control problems of flexible manufacturing systems. (T. U. Graduate School of Business Administration, Ed.) *Annals of Operations Research*, 3-12.
- Swannrkar, R., & Tiwari, M. (2004). Modeling Machine Loading Problem of FMS and its solution Methodology Using a Hybrid Tabu Search and Simulated annealing-Based Heuristic Approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20(3), 199-209.
- Tabucanon, M., Batanov, D., & Basu, S. (1998). Using Simulation to Evaluate the Batching Approach to Part Type Selection in Flexible Manufacturing Systems. *Integrated Manufacturing Systems*, 5-14.
- Tiwari, M., Kumar, S., & Bardhan, R. (2010). Operation allocation and part type selection in E-Manufacturing: An Auction Based Heuristics Supported by Agent Technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 312-324.
- Tiwari, M., Kumar, S., Prakash, & Shankar, R. (2006). Solving Part-Type selection and operation Allocation Problems in an FMS: An approach Using Constraint Based Simulated annealing Algorithm. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, 36(6), 1170-1184.
- Toyota. (n.d.). Retrieved 09 11, 2015, from Toyota Global Site : [http://www.toyota-global.com/company/vision\\_philosophy/toyota\\_production\\_system/just-in-time.html](http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/just-in-time.html)
- Van Looveren, A., Gelders, L., & Van Wassenhove, L. (1986). "A review of FMS planning models", In modeling and design of flexible manufacturing systems. (A. Kusiak, Ed.) *Elsevier Science Publishers B.V.*, 3-31.
- Van Looveren, J. A., Gelders, L. F., & Van Wassenhove, L. N. (1986). A review of FMS planning models In A. Kusiak (Ed), Modelling and design of Flexible Manufacturing Systems. *Elsevier*, 3-31.
- Van Vliet, M., & Rinnooy Kan, A. H. (1991). Machine allocation algorithms for job shop manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2, 83-94.
- Vielma, J. P. (2013). Mixed Integer Linear Programming Formulation Techniques. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 57(1), 3-57.
- Yogeswaran, M., Ponnambalam, S., & Tiwari, M. (2009). An efficient Hybrid evolutionary Heuristic Using Genetic algorithm and simulated annealing algorithm to solve machine loading problem in FMS. *International Journal of Production Research*, 47(19), 5421-5448.

# ANEXOS

---

## ANEXO 1. CODIFICACIÓN EN LINGO 10.0 PARA EL ESCENARIO 2

|\*\*\*\*\*

MODELO DE CARGA DE MAQUINAS.

\*\*\*\*\*

<<--FABRICA NACIONAL DE HERRAMIENTAS S.A. DE C.V.-->>

\*\*\*\*\*,

Model:

SETS:

!Conjunto de pedidos;

pedidos/1..18/:demanda, w,Y;

!Conjunto de estaciones (máquinas);

estaciones/1..9/:C,u,TD,TR;

!Conjunto de herramientas;

herramientas/1..6/:A,Lk;

!Herramientas-estacion;

Posicion(estaciones,herramientas): S,copias,t\_herramienta;

!Numero de rutas de procesado;

rutas/1..2/;

!Pedido-ruta;

Proporcion(pedidos,rutas): teta,gama;

!Identificacion de tiempos en funcion de: items, rutas de procesado, estaciones y herramientas;

tiempos(pedidos,rutas,estaciones,herramientas): T;

!Identificacion del tiempo de set-up;

tiempos1(pedidos,rutas,estaciones):ST;

endsets

data:

!Número muy grande que usaremos en la restricción 9;

M=10000;

!Número de maquinas por estación;

Mj= 1;

!Copias máximas disponibles de herramientas por cada tipo;

A=

8	9	11	14	10	17
---	---	----	----	----	----

;

!Almacenes de herramientas de cada máquina;

C=

8	8	12	7	15	11	14	10	5
---	---	----	---	----	----	----	----	---

;

!Número de posiciones de cada herramienta en el almacén;

S=

1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

;

!Vida útil de cada herramienta;

Lk=



125	300	325	150	350	200
-----	-----	-----	-----	-----	-----

;

!% de superacion de carga media;

alfa= 0.13;

!Demanda de cada pedido;

demanda=

31	35	50	10	10	50	10	36	56	30	28	14	7	36	8	12	5	10
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	---	----	---	----

;

!Prioridad de cada pedido;

w=

0.070	0.100	0.060	0.051	0.090	0.048	0.040	0.049	0.080	0.030	0.050	0.047	0.047	0.047	0.030	0.053	0.053	0.055
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

;

!Tiempo disponible de cada máquina;

TD=

2200	2290	2290	2200	2200	2200	2200	1880	1585
------	------	------	------	------	------	------	------	------

;

!Tiempos de fabricación del pedido p en la ruta r utilizando la herramienta k;

T=

**Anexo 2 Tabla de valores;**

!Tiempo de Set-Up del pedido p en la ruta r;

ST=

**Anexo 3. Valores del tiempo de set-up.**

;

@TEXT('FANDHER.txt')= @write( ' La suma de prioridades de los pedidos realizados es: ', prioridad,  
@newline(2));

@TEXT('FANDHER.txt')= @write( ' La carga media es: ', u\_media, @newline(2));

@TEXT('FANDHER.txt')= @write ( 'La carga total en minutos es: ', @sum(estaciones(j): u(j)),@newline(2));

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor (estaciones(j): ' Carga de estación nº ', 2* ' ', j , ' : ', 2* ' ', u(j),  
@newline(2));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor (estaciones(j): " , u(j),' ', @newline(1));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @write( ' Los pedidos a fabricar son los siguientes', @newline(2));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor (pedidos(p)|Y(p)#EQ#1: ' Pedido ', 4* ' ', p , 4* ' ', ' Prioridad ', 4*  
' , w(p), @newline(2),
```

```
    @writefor(rutas(r): 'La proporcion del pedido por la ruta ', r , ' es:', teta(p,r),@newline(1)), @newline(1)  
);
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor (pedidos(p)|Y(p)#EQ#1: " , p , ' ', @newline(1));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @WRITEFOR(estaciones(j): 'El tiempo restante por estacion es: ', TR(j),' ',  
@newline(1));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor(herramientas(k): ' La vida útil de la herramienta ',k,' es: ', Lk(k),'y se  
puede usar ',Lk(k)*A(k),' minutos', @newline(2));
```

```
@TEXT('FANDHER.txt')= @writefor (herramientas(k): " ,
```

```
@writefor(estaciones(j): 'El número de herramientas del tipo ', k , ' de la estación ', j , ' es: ', copias (j,k) , ' y se  
utilizan una cantidad de ', t_herramienta (j,k) , ' minutos',@newline(1));
```

enddata

!RESTRICCIONES;

```
!-----  
-----;
```

!1)Capacidad de almacén de herramientas de máquinas;

```
@for (estaciones (j) :
```

@sum

```
(herramientas (k) : S (j , k) *copias (j , k) ) <=C (j) ;
```

```
);
```

```
!-----  
-----;
```

!2)Limitación del número de copias de herramientas;

```
@for(herramientas(k):
```

@sum(estaciones(j): Mj\*copias(j,k))<=A;

);

!-----;

!3)Tiempo requerido de herramienta tipo k en estacion tipo j es menor que tiempo disponible de herramienta k en estacion j;

@for(herramientas(k):

@for(estaciones(j):

t\_herramienta(j,k)=@sum(pedidos(p):

(rutas(r):Demanda(p)\*T(p,r,j,k)\*teta(p,r)););

t\_herramienta(j,k)<=Mj\*Lk(k)\*copias(j,k);

);

);

!-----;

!4)Requerimientos de produccion;

@for(pedidos(p):

@sum

(rutas(r): teta(p,r)=Y(p);

);

!-----;

!5plus) añadiendo el tiempo de set up en la restricción;

@for(estaciones(j):

@sum(pedidos(p):

@sum(herramientas(k):

@sum(rutas(r):Demanda(p)\*T(p,r,j,k)\*teta(p,r)+@sum(pedidos (p):

@sum(rutas(r): gama(p,r)\*ST(p,r,j))))))=Mj\*u(j);

);

!-----;

!7)Carga media ;

u\_media=@sum(estaciones(j): u(j) ;

)/@size(estaciones);

!-----;

!8)Cargas máxima y mínima;

@for(estaciones(j):

u(j)<=(1+alfa)\*u\_media;

u(j)>=(1-alfa)\*u\_media;

);

!-----;

!9)Si el valor de Gamma =1 entonces en la restricción 6)se sumará el valor del ST para ese (p) en esa (r);

@for (pedidos(p):

@for(rutas(r):

gama(p,r)>=teta (p,r);

gama(p,r)<= M\*teta(p,r);

);

);

!----- -;

!Tiempo restante de cada máquina;

@for(estaciones(j):

TR(j)=TD(j)-u(j);

);

!-----;

!10) El tiempo de carga de cada máquina no podrá superar el Tiempo Disponible de cada máquina;

@for(estaciones (j):

u(j)<=TD(j);

);

!-----;

!Acotación de variables;

@for(pedidos(p):

@for(rutas(r):

teta(p,r)>=0;

);

);

@for(estaciones(j):

u(j)>=0;

);

!-----;

!Definición de funcion objetivo ;

prioridad=@sum(pedidos(p): w(p)\*Y(p) ;

);

!-----;

!FUNCIÓN OBJETIVO;

Max= prioridad;

!-----;

!Definición de binarias;

@for(pedidos:@BIN(Y));

@for(proporcion:@BIN(gama));

@for(Posicion:@GIN(copias));

!-----;

END





### ANEXO 3. TABLA DE VALORES PARA EL TIEMPO DE SET-UP

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	7.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	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	3.0	0.0	0.0
0.0	4.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
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	3.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	4.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	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	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	19.0	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	4.0	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



## ANEXO 4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRIMERA PRUEBA.

### RESULTADOS GENERADOS EN EL FICHERO.

Al terminar de correr el modelo se generaba automáticamente un fichero en un archivo de Block de notas. El nombre del fichero es "FANDHER.txt", a continuación se muestran los resultados.

La suma de prioridades de los pedidos realizados es: 1

La carga media es: 1740.8046

La carga total en minutos es: 15667.241

Carga de estación nº	1	:	1967.1092
Carga de estación nº	2	:	1926.0308
Carga de estación nº	3	:	1514.5
Carga de estación nº	4	:	1894.4106
Carga de estación nº	5	:	1514.5
Carga de estación nº	6	:	1967.1092
Carga de estación nº	7	:	1839.0816
Carga de estación nº	8	:	1530
Carga de estación nº	9	:	1514.5

Los pedidos a fabricar son los siguientes

Pedido	1	Prioridad	0.07
--------	---	-----------	------

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:1

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0

Pedido	2	Prioridad	0.1
--------	---	-----------	-----

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:1

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0

Pedido	3	Prioridad	0.06
--------	---	-----------	------

La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.67450982	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.32549018	
Pedido	4	Prioridad	0.051
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:1	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0	
Pedido	5	Prioridad	0.09
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:1	
Pedido	6	Prioridad	0.048
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.8	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.2	
Pedido	7	Prioridad	0.04
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.0001	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.9999	
Pedido	8	Prioridad	0.049
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.65565134	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.34434866	
Pedido	9	Prioridad	0.08
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.87047124	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.12952876	
Pedido	10	Prioridad	0.03
La proporcion del pedido por la ruta	1	es:0.062222222	
La proporcion del pedido por la ruta	2	es:0.937777778	
Pedido	11	Prioridad	0.05

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0.0001

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0.9999

Pedido 12 Prioridad 0.047

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:1

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0

Pedido 13 Prioridad 0.047

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0.098422499

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0.9015775

Pedido 14 Prioridad 0.047

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0.71111611

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0.28888389

Pedido 15 Prioridad 0.03

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:1

Pedido 16 Prioridad 0.053

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0.51263262

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0.48736738

Pedido 17 Prioridad 0.053

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:0

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:1

Pedido 18 Prioridad 0.055

La proporcion del pedido por la ruta 1 es:1

La proporcion del pedido por la ruta 2 es:0

El tiempo restante por estacion es: 232.8908

El tiempo restante por estacion es: 363.96924

El tiempo restante por estacion es: 775.5

El tiempo restante por estacion es: 305.58938

El tiempo restante por estacion es: 685.5

El tiempo restante por estacion es: 232.8908

El tiempo restante por estacion es: 360.91839

El tiempo restante por estacion es: 350

El tiempo restante por estacion es: 70.5

La vida útil de la herramienta 1 es: 125y se puede usar 1375 minutos

La vida útil de la herramienta 2 es: 300y se puede usar 3600 minutos

La vida útil de la herramienta 3 es: 325y se puede usar 4550 minutos

La vida útil de la herramienta 4 es: 150y se puede usar 2700 minutos

La vida útil de la herramienta 5 es: 350y se puede usar 4550 minutos

La vida útil de la herramienta 6 es: 200y se puede usar 4400 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 1 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 2 es: 3 y se utilizan una cantidad de 375 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 3 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 4 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 5 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 6 es: 1 y se utilizan una cantidad de 57.5 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 7 es: 6 y se utilizan una cantidad de 674.50982 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 8 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 1 de la estación 9 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 1 es: 7 y se utilizan una cantidad de 1901.1092 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 2 es: 1 y se utilizan una cantidad de 123.31138 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 3 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 4 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 5 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 6 es: 4 y se utilizan una cantidad de 961 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 7 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 8 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 2 de la estación 9 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 1 es: 1 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 2 es: 1 y se utilizan una cantidad de 258.05595 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 3 es: 2 y se utilizan una cantidad de 400 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 4 es: 1 y se utilizan una cantidad de 100 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 5 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 6 es: 3 y se utilizan una cantidad de 545.92334 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 7 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 8 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 3 de la estación 9 es: 5 y se utilizan una cantidad de 1472.5 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 1 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 2 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 3 es: 7 y se utilizan una cantidad de 771.73107 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 4 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 5 es: 5 y se utilizan una cantidad de 680 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 6 es: 2 y se utilizan una cantidad de 300 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 7 es: 4 y se utilizan una cantidad de 503.3924 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 8 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 4 de la estación 9 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 1 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 2 es: 3 y se utilizan una cantidad de 893.66343 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 3 es: 1 y se utilizan una cantidad de 75.768933 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 4 es: 5 y se utilizan una cantidad de 1510.4106 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 5 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 6 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 7 es: 4 y se utilizan una cantidad de 535.17939 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 8 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 5 de la estación 9 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 1 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 2 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 3 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 4 es: 1 y se utilizan una cantidad de 200 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 5 es: 4 y se utilizan una cantidad de 684.5 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 6 es: 1 y se utilizan una cantidad de 18.685852 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 7 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 8 es: 8 y se utilizan una cantidad de 1500 minutos

El número de herramientas del tipo 6 de la estación 9 es: 0 y se utilizan una cantidad de 0 minutos