

# Dividir y Conquistar en la Planificación de la Producción<sup>1</sup>

Marcos Singer<sup>2</sup>

Escuela de Administración  
Pontificia Universidad Católica de Chile

May 26, 2008

## Abstract

Este artículo describe las principales características del método de planificación de la producción usualmente utilizado en la Industria, denominado de *reglas de despacho*, que planifica de acuerdo a un índice de prioridad calculado para cada operación. Como alternativa se presenta la metodología llamada de *cueros de botella*, que planifica primero la máquina más crítica, luego la segunda más crítica, y así sucesivamente. Esto representa un cambio de énfasis en la labor de programación, desde el estar centrada en la tarea, para reorientarla hacia los recursos.

Basándose en estudios computacionales que se referencian, se explica por qué la adopción de este tipo de tecnología puede mejorar la competitividad de una empresa. Para ello se desarrolla un caso hipotético de una fábrica que desea diferenciarse del resto gracias a tiempos de entrega más convenientes para sus clientes. También se presentan aspectos de la implementación de sistemas de este tipo, que demandan una afinación del sistema de información de la planta, posibilitando con ello un mejor control de la gestión de Producción y Ventas.

## 1. Introducción

Una ventaja comparativa es una capacidad o recurso de una firma que le permite diferenciar su producto o servicio, o tener costos más bajos de operación o producción. Adecuadamente administradas estas ventajas pueden mantenerse a lo largo del tiempo, razón por la cual el desarrollarlas resulta una robusta manera de asegurar la competitividad de la empresa a través del tiempo.

Existen múltiples ejemplos de empresas que están alcanzando dichas ventajas competitivas a través de la adopción de técnicas avanzadas de Investigación Operativa para la planificación de la producción. Ejemplo de ello son el sistema de planificación de una

---

<sup>1</sup> *Revista de Ingeniería de Sistemas* 13, 55-66

<sup>2</sup> Este trabajo ha sido parcialmente financiado por FONDECYT proyecto 197/1021.

planta de circuitos integrados descrito por Ovacik & Uzsoy (1992) y el sistema implementado por Wu *et al.* (1993) en una fundición de acero.

En este artículo se presenta el caso hipotético de una empresa que está potenciando su gestión productiva gracias a la modernización de su sistema de planificación. Este sistema está basado en *reglas de despacho*, que consisten en calcular un índice de prioridad para cada una de las operaciones, y programarlas en las máquinas de acuerdo a dicho índice. El sistema propuesto, llamado de *cuernos de botella*, identifica la máquina más crítica y la programa en forma relativamente independiente del resto de las máquinas. Luego procede de manera similar con la segunda máquina más crítica, y así sucesivamente hasta programar toda la planta.

Este artículo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2 se detalla la problemática de la empresa y sus oportunidades de desarrollo. En la Sección 3 se hace una descripción formal del sistema de producción, mediante un ejemplo sencillo. En la Sección 4 se describe la metodología de las reglas de despacho, en tanto que en la Sección 5 se describe el método de cuernos de botella. En la Sección 6 se indican aspectos del sistema de información requerido por una metodología avanzada de planificación como la aquí descrita. Finalmente en la Sección 7 se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2. Problemática de la Empresa

Supongamos que una empresa fabrica productos a pedido en lotes que cumplen ciertas especificaciones definidas por cada cliente. La empresa enfrenta una fuerte competencia en el mercado nacional, razón por la cual su estrategia competitiva es diferenciar su producto mediante un óptimo servicio al cliente. Desde el punto de vista de la planificación de la producción, este servicio depende de poder ofrecer y cumplir con fechas rápidas de entrega, lo que está supeditado a la capacidad de la empresa de estimar correctamente tales fechas de entrega. Cada vez que se cursa una orden de producción la fecha de entrega es negociada entre el vendedor y el cliente. Si el vendedor es demasiado conservador en su estimación y por ello no ofrece una entrega suficientemente temprana, corre el riesgo de perder el negocio si el cliente necesita el pedido en forma urgente. Por otro lado, si la fecha comprometida es demasiado prematura, probablemente no se entregará el pedido a tiempo.

Esto provocará que el cliente pierda la confianza en la empresa, arriesgando la concreción de futuros negocios.

La fecha de entrega de una orden depende de su *lead-time*, que se define como el tiempo que demora un producto (o producto intermedio) en ser procesado. Por lo tanto, el mejoramiento del servicio depende de la correcta estimación y minimización de tales lead-times. Contrariamente a lo que se asumió por mucho tiempo, dichos tiempos de proceso no dependen tanto de la receta del producto, sino principalmente de la carga de trabajo de la planta. Tal como lo indican Hopp & Spearman (1996), este erróneo supuesto produjo durante la década de los Ochenta que un gran número de sistemas de control de inventario del tipo *Material Requirement Planning* (MRP) y *Manufacturing Resources Planning* (MRP II) produjeran excesivos niveles de inventario.

Asumiendo que el problema de estimación del lead-time puede ser resuelto, el siguiente objetivo es reducirlos gracias a una buena programación de los recursos. Hopp & Spearman (1996) estiman que el inventario en proceso (*work-in-process*) está en promedio entre el 90 y el 95% del tiempo en espera de ser procesado, causando que parte importante del capital de trabajo de una compañía esté inmovilizado. Una programación óptima de las máquinas permite aprovechar de manera más eficiente los recursos y definir cuáles resultan insuficientes, ayudando con ello a proyectar una expansión ordenada de la planta.

Un tercer elemento del proceso de planificación de la producción es el manejo de imprevistos. Aunque las fechas de entrega comprometidas sean realistas, la planta puede sufrir fallas de la maquinaria o incumplimiento de los proveedores. Estas situaciones obligan a replanificar las operaciones, teniendo como efecto que las órdenes se atrasen. Por ello la empresa necesita métodos como los indicados por Abumaizar & Svestka (1997) y Li *et al.* (1993) que rápidamente puedan generar programas de producción que minimicen el nivel de atraso de las órdenes.

Este artículo muestra una aplicación hipotética del algoritmo desarrollado por Pinedo & Singer (1999), cuya implementación se presenta en Pinedo *et al.* (1999). Este sistema de planificación tiene como objetivo mejorar el proceso productivo en los tres ámbitos anteriormente descritos.

### 3. Modelación del Problema

La primera etapa del esfuerzo de mejoramiento del proceso productivo consiste en describirlo de manera formal, resultado presentado por Singer & Pinedo (1998), y que se resume a continuación. Se desea procesar un conjunto de *órdenes de trabajo*, cada una con una *fecha mínima de inicio*, una *fecha de entrega* y una *ponderación*. La fecha mínima de inicio está determinada por factores exógenos a la empresa, tales como la llegada de la materia prima. La fecha de entrega se asume que ya ha sido fijada por el vendedor y el cliente, y que por lo tanto es un dato del problema. La ponderación depende de la importancia de la orden, que suele estar determinada por el valor del pedido, la importancia del cliente y otras consideraciones. Una orden consiste en el procesamiento de un número de *operaciones*, cada una con un cierto *tiempo de procesamiento* y con la restricción de que cada operación debe ser procesada en una cierta *estación de trabajo*. Una estación puede incluir una o varias *máquinas* de distintas velocidades, pudiendo cada máquina procesar una sola operación a la vez. La *tardanza* se define como la diferencia entre el instante en que se termina de procesar una orden y su fecha de entrega, y toma el valor cero si tal diferencia es negativa. El objetivo es minimizar la *suma ponderada de las tardanzas*, que se calcula como la sumatoria de la tardanza de cada una de las órdenes, multiplicada por su correspondiente ponderación. En la Tabla 1 se presenta un ejemplo de cuatro órdenes a procesarse en las estaciones de trabajo A, B, C, y D, en que B y C tienen dos máquinas cada una.

Tabla 1: Ejemplo de Órdenes a Procesarse en las Estaciones de Trabajo

orden	fecha mín. inicio	fecha de entrega	ponderación	secuencia en estaciones	tiempos de proceso
1	1	20	4	A,B,C,D	A1=2, B1=16, C1=5, D1=4
2	4	15	2	B,C,A,D	B2=4, C2=4, A2=4, D2=3
3	0	20	2	A,C,D,B	A3=3, C3=7, D3=2, B3=3
4	6	22	1	D,B,A,C	D4=5, B4=14, A4=3, C4=2

En este ejemplo la orden 1 tiene una fecha mínima de inicio de 1 por lo que podrá ser procesada sólo a partir de ese instante, y una fecha de entrega de 20. Su ponderación es de 4 por lo que sabemos que dicha orden es relativamente importante. Su procesamiento consiste primero en visitar la estación A (operación A1) que tiene un tiempo de procesamiento de 2 unidades, luego la estación B, luego la C y finalmente la D.

La Ilustración 1 muestra la Carta Gantt que representa la solución óptima en términos de suma ponderada de tardanzas. La estación de trabajo A procesa primero a la operación que corresponde a la orden 1, luego a la de la orden 3, luego a la de la orden 2 y finalmente a la de la orden 4. La última operación de la orden 1, que es procesada en la estación D, termina en el tiempo 28. Dado que su fecha de entrega es 20, este plan de producción incurre en una tardanza de 8 para la orden 1, misma que es multiplicada por su correspondiente ponderación 4. Análogamente, la tardanza de la orden 2 es  $19 - 15 = 4$  que es multiplicada por 2, y así sucesivamente. El resultado es una suma ponderada de la tardanza igual a 52.

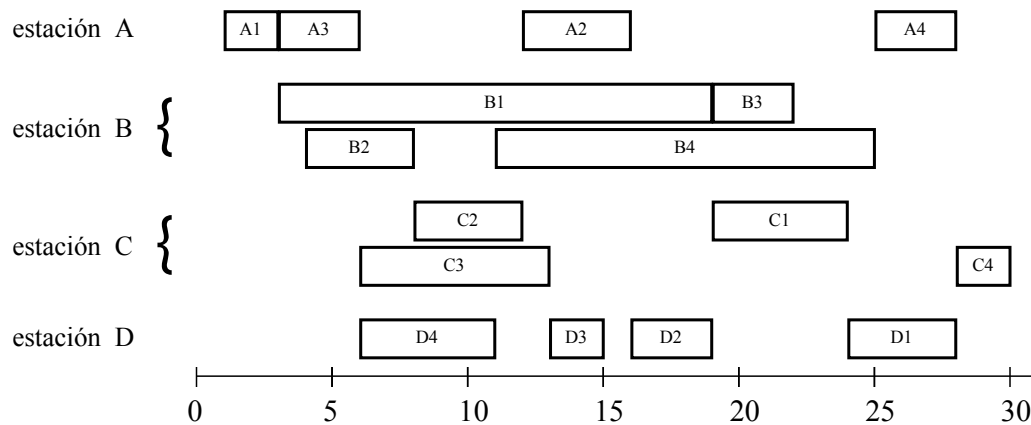


Ilustración 1: Carta Gantt de Solución de Mínima Tardanza

Este problema es referenciado en la literatura como el *Flexible Job Shop*, y tal como lo indican Applegate & Cook (1991) y Wein & Chevalier (1992), ha atraído una gran atención tanto de la comunidad científica como de la Industria. Se sabe que es extremadamente difícil de resolver en forma óptima, en tanto que los métodos que se conocen tienen tiempos de cómputo que crecen exponencialmente respecto del tamaño del problema. Considerando que la empresa puede requerir planificar mil órdenes o más, la metodología que se ocupe para programar la producción tendrá un impacto directo en la eficiencia de la empresa.

A continuación se describen dos metodología alternativas para resolver este problema de planificación: reglas de despacho que es probablemente la más utilizada en la Industria en la actualidad, y el método de *cuellos de botella* que presenta conceptos relativamente novedosos. Cabe señalar que existen otras técnicas de planificación tales

como la Programación Matemática descritas por Blazewicz *et al.* (1991), o la Inteligencia Artificial utilizada por Nussbaum *et al.* (1998a). Sin embargo, ninguna de ellas ha obtenido resultados que las hagan aplicables a problemas reales de la Industria en el corto plazo.

#### 4. Reglas de Despacho

Esta metodología consiste en planificar primeramente las operaciones cronológicamente próximas y luego aquellas más lejanas. Cada vez que una máquina se desocupa, se asigna una prioridad a cada una de las operaciones que están disponibles para ser procesadas. Según explica Vepsalainen & Morton (1987), esta prioridad puede depender de los siguientes elementos:

- El tiempo de procesamiento de la operación: si este tiempo sube, la prioridad de la operación baja.
- La ponderación de la orden correspondiente: mayores ponderaciones obtendrán prioridades más altas.
- La proximidad de la fecha de entrega de la orden: fechas cercanas implicarán mayor prioridad.
- La disponibilidad de la operación: si la operación no está inmediatamente lista para ser procesada entonces baja su prioridad.

Aquella operación que obtiene la más alta prioridad es elegida o *despachada* como el siguiente trabajo en la máquina correspondiente, procediéndose en forma análoga hasta programar todas las operaciones.

Esta técnica está ampliamente difundida en la Industria porque es fácil de entender e implementar. No sólo es utilizada por las personas encargadas de la planificación, sino también por la mayoría de los sistemas de programación automáticos. Sin embargo, las soluciones generadas son de muy baja calidad en problemas de tamaño realista. De hecho, esta metodología es apodada como “miope”, pues sólo considera información inmediata, ignorando el horizonte total de planificación.

## 5. Método de Cuellos de Botella

Para problemas de planificación complejos la estrategia de dividir y conquistar utilizada por los métodos de cuellos de botella puede resultar muy efectiva. Estos métodos dividen el problema original en distintas partes, dándole prioridad a aquellos subproblemas que resultan más críticos para la solución general.

Una de las implementaciones más efectivas de este concepto es el método *Shifting Bottleneck* desarrollado por Adams *et al.* (1988), que es adaptado por Pinedo & Singer (1999) a la modelación descrita en la Sección 2. Esta técnica subdivide el job shop en un número de subproblemas, cuyas soluciones son integradas para conformar un programa general de producción. Cada subproblema consiste en planificar de manera óptima una estación de trabajo en forma relativamente independiente del resto de la planta. La Ilustración 2 muestra sus principales pasos:

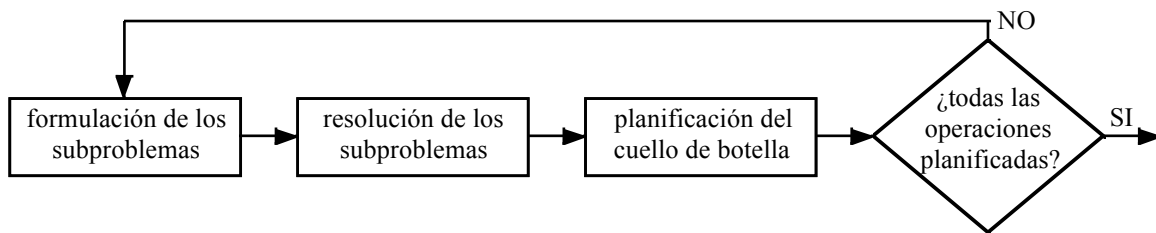


Ilustración 2: Método de Cuellos de Botella

La *formulación de los subproblemas* crea un subproblema por cada estación de trabajo, extrayendo del resto de la planta la información que permite que la solución de dicho subproblema pueda ser integrada en forma coherente a la solución general. La *resolución de los subproblemas* busca la planificación óptima de cada estación de trabajo mediante la enumeración de todas las soluciones posibles. Aquellas estaciones en las que se forman colas de operaciones esperando ser procesadas son llamadas cuellos de botella, mientras que las estaciones que tienen una baja carga de trabajo son consideradas como poco críticas. La *planificación del cuello de botella* determina el plan de producción de la estación de trabajo más crítica. En las iteraciones posteriores se planifica la segunda estación más crítica, luego la tercera, y así sucesivamente. De esta manera, el método le da una mayor libertad de acción a las estaciones cuello de botella, esperando que aquellas que no lo son puedan acomodarse al programa definido para las primeras.

A continuación presentamos el proceso de planificación de Cuellos de Botella aplicado al ejemplo de la Ilustración 1. El primer paso consiste en formular cuatro subproblemas, uno por cada estación de trabajo. Cada subproblema consta de cuatro operaciones que tienen asociadas fechas mínimas de inicio, fechas de entrega y ponderaciones. El segundo paso resuelve cada subproblema en forma independiente del resto. Así por ejemplo, calcula la tardanza que se produciría en la planta al programar la estación A, asumiendo que las estaciones B, C y D no requieren ser planificadas. Luego calcula la tardanza que se produciría al programar B asumiendo que A, C y D no requieren ser planificadas, y así sucesivamente. Aquellas estaciones que tienen una fuerte carga de trabajo, como la estación B, producirán una gran tardanza. Las que tengan menor carga, como por ejemplo C, causarán una menor tardanza. La primera iteración del método termina al programar la estación que producirá la mayor tardanza, que en este caso corresponde a B. La segunda iteración consiste en formular solamente tres subproblemas, pues ya se programó una de las estaciones. La tercera iteración sólo formula dos subproblemas, y finalmente la cuarta iteración planifica la última estación de trabajo.

El principal aporte conceptual de esta metodología es desplazar el centro de atención desde las *tareas*, que en nuestro caso son las operaciones de cada orden de trabajo, a los *recursos*, que en nuestro caso corresponden a las estaciones de trabajo. El enfoque orientado a las tareas es más intuitivo, pues el sistema de producción es evaluado en función de la tardanza de las tareas. Los recursos, por otro lado, sólo son herramientas para lograr los objetivos, y en nuestro caso no tienen directa relación con las medidas de eficiencia. Es así como el relegar las operaciones a un segundo plano con el objetivo de balancear adecuadamente la carga de las máquinas puede parecer contraintuitivo. Sin embargo, experimentos computacionales reportados por Pinedo & Singer (1999) para problemas “de laboratorio” y por Singer (1999) para problemas realistas, demuestran que esta técnica asegura una adecuada utilización de los recursos durante todo el horizonte de planificación, generando programas de mayor calidad que los producidos por reglas de despacho.

A partir de esta conceptualización, la técnica de cuellos de botella puede ser implementada en un número de empresas de producción y servicios. En todas ellas se deben realizar tareas utilizando los recursos disponibles, que pueden ser maquinaria,



personas, vehículos, etc. En aquellos casos para los cuales sea más conveniente una planificación orientada a los recursos y no a las tareas, es muy posible que la metodología de cuellos de botella tenga resultados altamente satisfactorios.

## 6. Aspectos de Implementación y Resultados

Tal como se indica en la Sección 4, la metodología de las reglas de despacho es utilizada por la mayoría de los sistemas de planificación tanto manual como computarizada, debido a que no requiere una gran cantidad de información acerca de la planta. Por otro lado, el método de cuellos de botella debe ser implementado como parte de un sistema de información integral, como el descrito por Nussbaum *et al.* (1998b). De acuerdo con la Ilustración 3, dicho sistema puede ser conceptualizado como la interfaz entre el Departamento Comercial y la Planta de Producción.

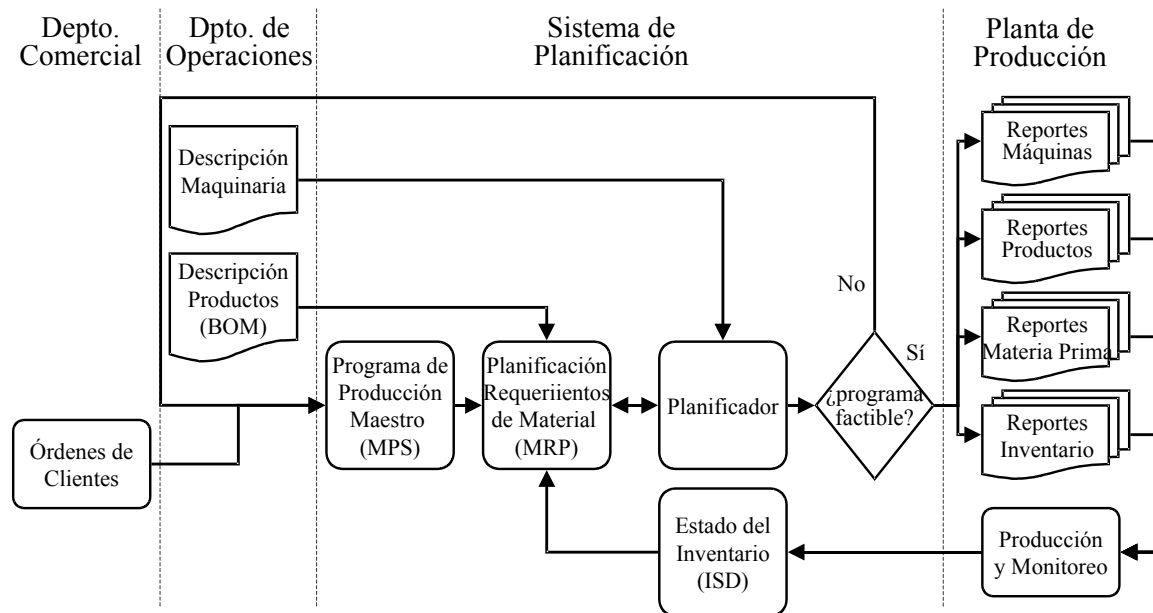


Ilustración 3: Conceptualización de un Sistema de Información

El Programa de Producción Maestro (Master Production Scheduling MPS) es alimentado por información comercial proveniente principalmente de las órdenes cursadas por los clientes, pero también eventualmente del plan de ventas y el pronóstico de la demanda. Estos datos son complementados por la información operacional de la Descripción de Productos (Bill of Materials BOM) que es una descripción jerárquica de cada producto en

función de sus productos intermedios y materia prima. Estos datos son procesados por el módulo de Planificación de Requerimientos de Material (Material Requirements Planning MRP) que genera las órdenes de compra, sin todavía considerar problemas de capacidad de la planta.

El módulo Planificador, que incluye el algoritmo de cuellos de botella, considera la descripción de la maquinaria para generar un programa de producción factible. Si no puede encontrarlo, modifica el Programa de Producción Maestro repitiendo el ciclo hasta tener un programa aceptable. La efectividad del algoritmo de cuellos de botella utilizado por este módulo se compara con la efectividad de una versión mejorada del algoritmo de Vepsalainen & Morton (1987). Para ello se realizan experimentos computacionales en 12 problemas disponibles en la literatura, y que son comúnmente utilizados en la comparación de algoritmos. Tal como lo muestra la Tabla 2, el desempeño del algoritmo propuesto supera claramente al logrado por las reglas de despacho. Adicionalmente, la tabla incluye los resultados óptimos de suma ponderada de las tardanzas, que es obtenido por el método de cuellos de botella en aquellos casos que se indican con un asterisco (\*).

Tabla 2: Comparación entre el Algoritmo de Cuellos de Botella y el de Regla de Despacho

Problema	Tardanza Óptima	Cuellos de Botella		Regla de Despacho	
		Tardanza	Tiempo	Tardanza	Tiempo
ABZ5	69	77	518	108	600
ABZ6	0	*	1	0	1
LA16	166	175	533	421	600
LA17	260	*	155	353	600
LA18	34	*	224	329	600
LA19	21	*	316	73	600
LA20	0	*	174	282	600
LA21	0	*	220	62	600
LA22	196	*	427	690	600
LA23	2	*	396	56	600
LA24	82	*	216	380	600
MT10	394	*	330	1039	600

Una vez que el proceso de planificación se completa, el sistema genera un conjunto de reportes: la secuencia de operaciones en cada máquina, el plan de producción para cada producto, el plan de compras de materia prima, y reportes del nivel estimado de inventario.

Esta información es entregada en informes impresos o a través de una interfaz gráfica. Con ella se realiza la función de producción y monitoreo, la que envía los resultados al módulo de Estado del Inventario (Inventory Status Data ISD).

La interfaz gráfica incluye Cartas Gantt de máquinas y productos como la que se muestra en la Ilustración 4, diagramas de inventario como el que se ve en la Ilustración 5 y otros editores de datos\* .

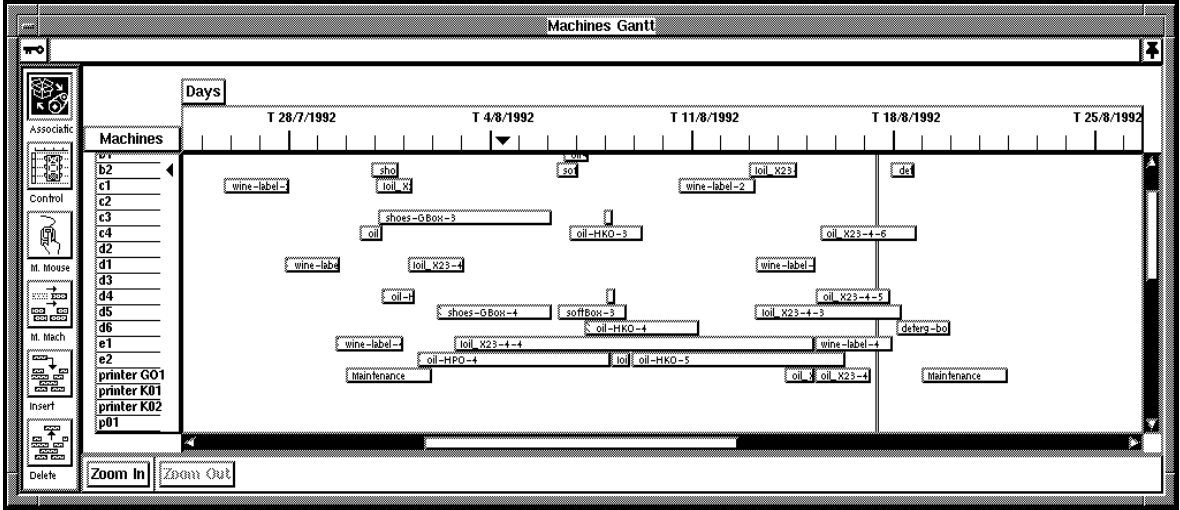


Ilustración 4: Carta Gantt del Sistema de Información

\* Reproducidos con la autorización de la empresa de Software SOLEX S.A.

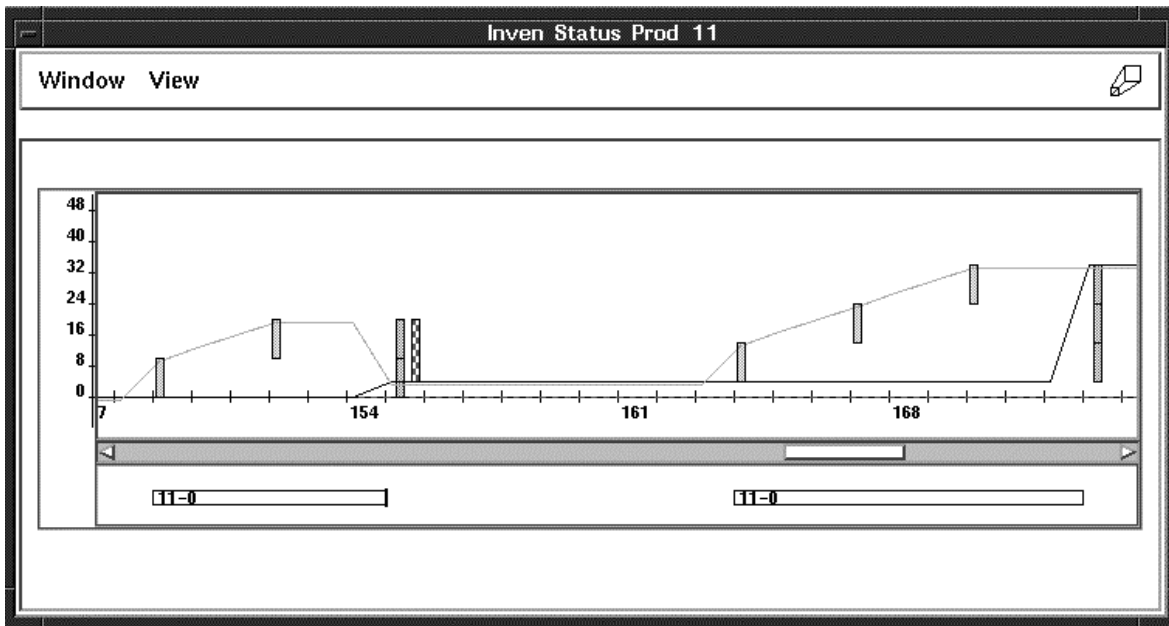


Ilustración 5: Diagrama de Inventario

Además del beneficio directo de lograr menores atrasos en las entregas, la implementación de un sistema avanzado de planificación tiene una serie de “efectos secundarios”. Tal como lo muestra la Ilustración 3, este sistema está basado en la información provista por los departamentos Comercial y Operaciones, situación que demanda una auditoría del sistema general de información de la empresa. Esto tiene como efecto mejorar la calidad y disponibilidad de la información, que posibilita una mejor estimación de los lead times asociados a cada orden de producción.

## 7. Conclusiones

Con frecuencia se indica que el gran desarrollo teórico que ha experimentado la Investigación de Operaciones la ha distanciado de la realidad de la Industria. En este artículo se muestra el diseño lógico de un sistema que rescata los principales conceptos del algoritmo de cuellos de botella y lo aplica a una planta de producción. Esta técnica se concentra en los recursos en vez de hacerlo en las tareas, que es el enfoque de la técnica convencional de las reglas del despacho. Dándole preponderancia a las máquinas críticas en vez de a las operaciones urgentes, se toman decisiones que optimizan el horizonte total de planificación en vez del corto plazo.

En resumen, la implementación de un sistema avanzado de planificación de la producción permite mejorar la estimación de los tiempos de entrega dada la exigencia de contar con un sistema de información y monitoreo sofisticado. Los tiempos de producción bajan debido a una mejora utilización de los recursos, lo que tiene como resultado el ofrecer tiempos de entrega más convenientes para el cliente. Finalmente la capacidad de programar eficientemente posibilita una recuperación más oportuna en caso de imprevistos. Todo ello redundando en un mejor servicio para el cliente, que se traduce en una importante mejora de la competitividad de la empresa.

## Referencias

- Abumaizar & Svestka (1997) "Rescheduling Job Shops Under Random Disruptions", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, 2065-2082
- Applegate, D. & Cook, W. (1991) "A Computational Study of the Job Shop Scheduling Problem", *ORSA Journal of Computing*, Vol. 3, No. 2, 149-156
- Blazewicz, J., Dror, M. & Weglarz, J. (1991) "Mathematical Programming Formulations for the Machine Scheduling: A Survey", *European Journal of Operations Research*, Vol. 51, 283-300
- Hopp, W. & Spearman, M. (1996) "Factory Physics" Irwin, Boston MA
- Li, R., Shyu, Y. & Adiga, S. (1993) "A Heuristic Rescheduling Algorithm for Computer-Based Production Scheduling Systems," *International Journal of Production Research*, Vol. 31, 1815-1826
- Nussbaum, M., Sepúlveda M., Singer, M. & Laval, E. (1998a) "An Architecture for Solving Sequencing and Resource Allocation Problems Using Approximation Methods" *Journal of the Operations Research Society* Vol. 49, pp. 52-65
- Nussbaum, M., Singer, M., Garretón, G. & Hernandez, H. (1998b) "An Interactive MRP II – Scheduling System", en capítulo 5 del libro Beyond Manufacturing Resource Planning (Drexl, A. & Kimms, A. Eds.) *Springer-Verlag*, Berlin pp. 357-378
- Ovacik, I. & Uzsoy, R. (1992) "A Shifting Bottleneck Algorithm for Scheduling Semiconductor Testing Operations" *Journal of Electronic Manufacturing*, Vol. 2, 119-134
- Pinedo, M., Chao, X., Feldman, A., Asadathorn, N., Kreipl, S., Singer, M. & Yang Y. (1999) software "LEKIN" en Pinedo M. & Chao, X. (1999) "Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services" *Irwin/McGraw-Hill*, New York
- Pinedo M. & Singer, M. (1999) "A Shifting Bottleneck Heuristic for Minimizing the Total Weighted tardiness in a Job Shop" *Naval Research and Logistics* Vol. 46, pp. 1-17
- Singer, M. & Pinedo M. (1998) "Computational Study of Branch and Bound Techniques for Minimizing the Total Weighted Tardiness in Job Shops" *IIE Transactions*, Vol. 29, pp. 109-119
- Singer, M. (1999) "Decomposition Methods for Very Large Job Shops" enviado a *Computers and Operations Research*
- Vepsalainen, A. & Morton, T. (1987) "Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Cost", *Management Science*, Vol. 33, No. 8, 1035-1047
- Wein, L.M. & Chevalier, P.B. (1992) "A Broader View of the Job-Shop Scheduling Problem", *Management Science*, Vol. 38, pp.1018-1033
- Wu, S., Byeon, E. & Storer R. (1993) "A Graph-Theoretic Decomposition of Job Shop Scheduling Problems to Achieve Scheduling Robustness" Technical Report, Department of Industrial Engineering, Lehigh University