4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIV Congreso de Ingeniería de Organización
Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010

Modelo programación por metas MILP para la planificación de operaciones de una planta de ensamblaje de motores.

Julien Maheut[1], Jose Pedro Garcia-Sabater[1], Francisco Gómez Gómez[1], Jairo Rafael Coronado Hernández[2]

[1] ROGLE Departamento. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Edificio 7D, Camino de Vera S/N. Universidad Politécnica de Valencia. 46022 Valencia España. [2]. GIPC Universidad Tecnológica de Bolívar. Parque Tecnológico Carlos Vélez Pombo. Cartagena de indias-Colombia
juma2@etsii.upv.es, jpgarcia@omp.upv.es, fcogogo@cigip.upv.es, jaracohe@gmail.com

Palabras clave: Planificación maestra, Modelo MILP, Programación por metas, Sector automovilístico.

Resumen

El objeto de este artículo es proponer un modelo centralizado de la planificación maestra (MP) que determina la capacidad productiva (CPP) (ritmos de producción y de un calendario) real de funcionamiento simultáneamente en una línea de ensamblaje de motores y en las principales cinco líneas de mecanizado. El modelo MILP con programación secuencial por metas, que se presenta, pretende, de un lado, minimizar los costes totales logísticos de la cadena de suministro y por otro lado, establecer una caracterización de los objetivos perseguidos por las líneas para siempre cumplir con las expectativas de los planificadores.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la gran parte de las industrias han tenido que diversificar la gama de productos para cumplir con las expectativas de clientes de diferentes segmentos del mercado. Como consecuencia, las compañías han debido enfrentarse a un aumento de la complejidad en la gestión de sus cadenas de suministro.

Con una demanda en productos con ciclos de vida y tiempos de respuesta cada vez más cortos (Christopher, 1998), las cadenas de suministros han de ser ágiles y flexibles con el objetivo de servir eficientemente a los clientes (Christopher y Towill, 2000). Como respuesta a la existencia de las dependencias inter-organizacionales que existen a lo largo de una CdS, Xu y Beamon (2006) declaran que la coordinación se ha transformado en un reto estratégico.

El sector automovilístico se ha caracterizado durante decenas de años por tener una demanda relativa estable y previsible (Monden, 1981). Esta estabilidad ha permitido establecer relaciones estables y fuertes a lo largo de toda la CdS permitiendo que la mayoría de las empresas trabajan con la filosofía Justo a Tiempo (JIT) y evitando los costes de inventarios innecesarios (Womack et al., 1990). Hoy día, teóricamente, las empresas ensambladoras de coches son capaces de montar hasta 2^{32} variantes de coches debido a un número creciente de opciones diferentes (Fleischmann et al., 2006). Como consecuencia, sus proveedores deben ser capaces de fabricar y abastecer una multitud de productos con ciclos de vidas cada vez más cortos. A medida que vaya aumentando la variabilidad creciente de productos, el funcionamiento y por consecuencia las tareas de planificación se ven afectadas. Lo que se consideraba ayer como restricciones únicamente operativas tienden a tener mucha relevancia a horizontes más largos.

Por otra parte, al final del año 2008, esta necesaria estabilidad se vio aún más comprometida fuertemente con la crisis económica (Haugh et al., 2010) y como consecuencia directa, el cierre de muchas plantas del sector automóvil y una re-organización de las capacidades productivas a nivel mundial y una incertidumbre e inestabilidad de la demanda. En caso de inestabilidad como fue el caso durante la crisis, los planificadores de las empresas suelen realizar actualizaciones más frecuentes de sus planes para reaccionar con más rapidez a estos cambios brutales. De este modo los planes que solían tener vigencia de semanas e incluso de meses pasaron a tener vigencias reales mucho más cortas.

La planificación maestra (o planificación a 6 meses (6MPM)) es el proceso que consiste en ajustar la capacidad productiva optimizando el uso de la maquinaria y de la mano de obra simultáneamente a calendarios laborales para cumplir con la demanda de los clientes teniendo en cuenta los diferentes cuellos de botellas de la CdS. Existen varias estrategias para ajustar la capacidad productiva con el fin de cumplir la demanda, la estrategia de caza, la estrategia de nivelación de producción o estrategias mixtas (Olhager et al., 2001). En el caso de estudio objeto de este articulo, las líneas disponen de un exceso de capacidad productiva que les permite tener unos niveles de stock del orden de 2 días de demanda en periodos normales. Cuando se acercan periodos de vacaciones, los niveles de stock tienen que aumentar progresivamente para cumplir en cualquier caso este desfase de alineamiento de los calendarios laborales. Teniendo en cuenta que las restricciones laborales son importantes y que la cadena de suministro no puede soportar cambios para suministrar de manera adecuada sus piezas, la estrategia perseguida por la empresa es una estrategia mixta entre la estrategia de nivelación y la de caza manejando los calendarios laborales y los ritmos diarios de producción.

Para resolver esta problemática e implementarlo dentro de las líneas consideradas, una primera fase consistió en la elaboración de un modelo centralizado MILP único dentro de un “Decision Support System” (Garcia-Sabater et al., 2009a; Garcia-Sabater et al., 2009b). Durante esta primera fase, únicamente se tenía en cuenta los objetivos importantes de los planificadores atribuyendo a todos los factores a los costes oportunos. Debido a problemas de datos del propio ERP de la empresa y a la multitud de objetivos de naturaleza distinta a minimizar, se plantea un nuevo enfoque: programación matemática por metas con el fin de satisfacer las expectativas de los clientes en cualquier caso.

El resto del artículo se organiza de la manera siguiente. En la sección siguiente, se presenta una breve descripción del problema. En la sección 3, se aborda la definición del modelo MILP por metas. Finalmente, las conclusiones y discusiones de las futuras investigaciones se presentan en la sección 4.

2. Descripción del problema

Un motor de combustión interna es un producto compuesto de una variedad de componentes que son fabricados y ensamblados en una línea de ensamblaje (Wang y Sarker, 2005). Los motores típicamente están compuestos de 350 hasta 450 piezas (Whitney et al., 2001) que son ensamblados en el producto final, pero los componentes principales más costosos son el bloque, la culata, las bielas, el árbol de levas y el cigüeñal (conocidos como los 5Cs) (Lloret et al., 2009). La producción de un motor es un proceso complejo teniendo en cuenta que se deben producir y ensamblar una gran variedad de componentes para crear un gran número de posibles tipos de motores (diferentes cilindradas, opciones de inyección de carburante, gasolina/diesel, etc.) (Taylor et al., 2005).

La planificación a medio-plazo suele dividirse en dos módulos principales: la Planificación Maestra (MP) y la Planificación de la Demanda (DP). En este articulo, se adapta e implementa el módulo MP. Según Meyr et al. (2005), el objetivo del proceso de planificación maestra consiste en la sincronización de los flujos de materiales en la totalidad de la cadena de suministro a un horizonte a medio plazo. Wang y Liang (2004) declaran que la MP tiene como objetivo la determinación del mejor modo de cumplir la demanda ajustando la capacidad productiva (Niveles de mano de obra, horas extras, sub-contratación, out-sourcing, etc.) y los niveles de inventario.

En la planificación a 6 meses que se presenta en este artículo, solamente se planifican las capacidades productivas, los planes de producción detallados y planes de necesidades. Las capacidades productivas se determinan en función de un calendario ya predeterminado y tiene por objetivo optimizar las configuraciones de producción de las líneas (número de turnos, ritmos de producción) asumiendo que los costes no son lineales. Los planes detallados de producción y de necesidades cumplen con todas las restricciones internas de funcionamiento (Limites de capacidad de almacenamiento, stocks de seguridad, setups, etc.) así como las características de los proveedores y los clientes.

3. Formulación del modelo MILP monolítico

3.1. Índices

$i \in \; i^{M}; i^{C}; i^{MP}$ = Productos: i^{M} = motores, i^{C} = componentes y i^{MP} = Materia prima

$l \in \; l_{M}, l_{C1}, .., l_{C5}$ = Líneas de producción: l_{M} = línea de ensamblaje de motores y l_{Cn} = líneas de mecanización de componentes

$t = \; 1, .., T$ = Periodo de planificación

$\beta = \; ND; ES$ = Tipo de días: ND = Días normales y ES = Turnos extras

$c \;\; l$ = Configuración de la línea l

3.2. Datos

T = Horizonte de planificación

$D_{i,t}$ = Demanda de producto i durante la semana t

$SS_{i,t}$ = Stock de seguridad deseado en producto i a final del periodo t

Y_{i} = Stock inicial de producto i

SD_{l} = Capacidad máxima de almacenamiento de la línea l

$Q_{i,i}$ = Lista de material para cada producto i

$J_{l,t}^{\beta}$ = Calendario de funcionamiento existente inicialmente en la línea l durante la semana t

$J_{l,t}^{MAX,\beta}$ = Número máximo de días que se pueden trabajar en la línea l durante la semana t en días beta

$RPL_{i,t}$ = Recepción planificadas de producto i durante la semana t

$R_{c(l),l}$ = Ritmos de producción posibles para cada línea l en función de la configuración c

$S_{c(l)}$ = Cantidad de turnos diarios de producción en la configuración c

$TD_{c(l),l}^{\beta}$ = Número de días de trabajo en la línea l asociado a la configuración c en un periodo de tipo beta

$L_{l,i}$ = Lista de los productos i que se fabrican en la línea l

M_i^1, M_l^2 = Números grandes

$C\_conf_{c(l),l}^{\beta}$ = Coste asociado a la línea l trabajando en la configuración c en un periodo de tipo beta

$C\_nwd_{l,t}$ = Coste de añadir un nuevo día productivo en la línea l en la semana t

$C\_ndd_{l,t}$ = Coste de quitar un día productivo en la línea l en la semana t

C_camb_l = Coste de setup asociado a un cambio de ritmo de producción

$C\_balanceo_t$ = Coste de no-balanceo de los niveles de stock

$C\_complej_{l,t}$ = Coste de setup por producir un derivado en la línea l durante la semana t

C_niv_i = Coste por no tener una nivelación de producción de los productos i

$C\_stock_{i,t}$ = Coste de almacenar productos i que no tienen más demanda durante la semana t

3.3. Variables

$x_{i,t}$ = Producción de producto i durante el periodo t

$y_{i,t}$ = Stock de producto i a final del periodo t

$wd_{l,t}$ = Días productivos en la línea l durante el periodo t

$nwd_{l,t}$ = Nuevos días productivos añadidos en la línea l durante el periodo t

$ndd_{l,t}$ = Nuevos días sin producción añadidos en la línea l durante el periodo t

$nes_{l,t}$ = Nuevos turnos extras añadidos en la línea l durante el periodo t

$\chi_{i,t}$ = Diferencia de nivel de producción de producto i en t comparado con el periodo anterior

$\delta^1_{i,t} \in \{0,1\}$ =1 Si se produce el producto i durante el periodo t (0 en caso contrario)

$\underline{der_{l,t}} / \overline{der_{l,t}}$ = Número mínimo/máximo de derivados que se pueden producir durante el periodo t en la línea l

$\lambda^{\beta}_{l,c,t}$ = Vector SOS1 (Special Ordered Set) tal que $\forall \; \beta, l, t \; : \sum_c \lambda^{\beta}_{l,c,t} = 1$

NC_l = Número de cambio de ritmos de producción en la línea l

$\delta^2_{l,t} \in \{0,1\}$ =1 Si se produce un cambio de ritmo de producción en la línea l durante el periodo t (0 en caso contrario)

$\varepsilon_{l,t}$ = Nivel de balanceo de los stock en la línea l durante la semana t

$\Delta_{l,t}$ = Diferencia de ritmo de producción en la línea l durante la semana t

3.4. Función objetivo

La función objetivo consiste en la minimización de los costes totales de la cadena de suministro. Cabe destacar tres objetivos fundamentales: La minimización de los costes de cambios de los calendarios de funcionamiento de las distintas líneas, la minimización de costes de la maquinaria y del personal y la minimización de los costes de inventarios y de la producción.

$$\min \; \{Costes\,totales\} = \min \; \{Obj1 + Obj2 + Obj3\}$$
$$[Obj1] : Costes\,cambios\,calendarios$$
$$[Obj2] : Costes\,maquinaria\;y\;personal$$
$$[Obj3] : Costes\,inventario + Costes\,complejidad + Costes\,nivelación$$

$$[Obj1] = \sum_l \sum_t \; nwd_{l,t} \cdot C\_nwd_{l,t} + ndd_{l,t} \cdot C\_ndd_{l,t} + nes_{l,t} \cdot C\_nes_{l,t}$$

$$[Obj2] = \sum_l \sum_{c(l)} \sum_\beta \sum_t \; \lambda^{\beta}_{c(l),l,t} \cdot C\_conf^{\beta}_{c(l),l} + NC_l \; \cdot C\_Camb_l$$

$$[Obj3] = \left\{ \begin{array}{l} \sum_t \; \varepsilon_{l,t} \cdot C\_balanceo_{l,t} \;\; + \sum_i \sum_t \; y_{i,t} \cdot C\_stock_{i,t} \\ \sum_l \sum_t \; \overline{der_{l,t}} \cdot C\_complej_{l,t} \\ \sum_i \sum_t \; \chi_{i,t} \cdot C\_niv_i \end{array} \right\}$$

3.5. Restricciones

A continuación, se presentan el sentido de cada una de las restricciones que se incorporan en el modelo monolítico.

Las restricciones (0.1), (0.2) y (0.3) representan la continuidad del flujo de material para todos los tipos de productos. La restricción (0.4) representa la inicialización de los niveles de stock de todos los productos. Para balancear los niveles de stock de manera adecuada, la restricción (0.5) usa una variable $\varepsilon_{l,t}$ que intenta balancear los niveles de stock de manera proporcionada en cada línea. Debido a restricciones de espacio, el nivel de inventario a final de cada línea tiene que ser inferior a una capacidad física conocida (0.6). Debido al diseño de la línea, no se puede alcanzar una producción nivelada de todos los productos en cada periodo. Fabricar una variedad alta de productos durante un periodo puede suponer coste de setup importante por lo cual las restricciones (0.7) y (0.8) permiten determinar el número máximo de derivados de productos que se fabrican en cada periodo. La restricción (0.9) permite medir la diferencia de niveles de producción entre dos periodos consecutivos. Esta penalización permite intentar estabilizar y niveles los motores de alto nivel de demanda y también igualar la fabricación en distintas líneas de productos que se fabrican en pares.

Debido a los altos costes de la maquinaria, la fabricación de producción debe igual el ritmo de producción semanal (0.10). En esta restricción, la producción que se alcanzará será función de la configuración “c” cuyas propiedades son el número de turnos, el ritmo por turno y el número de días de producción. Las restricciones (0.11) y (0.12) se presentan aquí para mostrar que no se puede añadir un día productivo al calendario añadiendo otro la misma semana en la misma línea y la siguiente representa la imposibilidad de añadir un turno extra quitando un día laboral normal. Estás restricciones no se incorporaron así en el modelo ya que no son lineales. Las restricciones (0.13), (0.14) y (0.15) permiten contabilizar para cada línea el número de cambios de ritmos de producción que ocurren durante el horizonte de planificación.

Una de las restricciones internas de las líneas es que si hay turnos extra, el ritmo de cada turno debe ser igual al ritmo de la semana considerada (0.16). Por otra parte, los calendarios de funcionamiento están sujetados a condicionantes internos y por consecuencia, en la restricción (0.17), el número máximo de días laborales normales y de turnos extras están limitados en cada periodo y en cada línea. Y como ya existe un calendario que ha sido validado en los periodos anteriores por la gerencia, las restricciones (0.18) y (0.19) permiten identificar las modificaciones propuestas por el modelo.

$$y_{i^M,t} = y_{i^M,t-1} + x_{i^M,t} - D_{i^M,t} \qquad \forall\ i^M, t \tag{0.1}$$

$$y_{i^C,t} = y_{i^C,t-1} + x_{i^C,t} + RPL_{i,t} - D_{i^C,t} - \sum_{i^M} Q_{i^C,i^M} \cdot x_{i^M,t} \qquad \forall\ i^C, t \tag{0.2}$$

$$y_{i^{MP},t} = y_{i^{MP},t-1} + RPL_{i^{MP},t} - \sum_{i^C} Q_{i^{MP},i^C} \cdot x_{i^C,t} \qquad \forall\ i^{MP}, t \tag{0.3}$$

$$y_{i,0} = Y_i \qquad \forall\ i \tag{0.4}$$

$$y_{i,t} \geq SS_{i,t} \cdot\ 1 - \varepsilon_{l,t} \quad con \quad \varepsilon_{l,t} \leq 1 \qquad \forall\ i, l, t \tag{0.5}$$

$$\sum_i L_{l,i} \cdot y_{i,t} \ \leq SD_l \qquad \forall\ l, t \tag{0.6}$$

$$x_{i,t} - M_i^1 \cdot \delta_{i,t}^1 \leq 0 \qquad \forall\ i, t \tag{0.7}$$

$$\underline{der_{l,t}} \leq \sum_i L_{l,i} \cdot \delta_{i,t} \ \leq \overline{der_{l,t}} \qquad \forall\ l, t \tag{0.8}$$

$$\left| x_{i,t} - x_{i,t-1} \right| \leq \chi_{i,t} \qquad \forall\ i, t \tag{0.9}$$

$$\sum_i L_{l,i} \cdot x_{i,t} \ = \sum_\beta \sum_{c(l)} R_{c(l),l} \cdot S_{c(l)} \cdot TD_{c(l),l}^\beta \cdot \lambda_{l,c,t}^\beta \qquad \forall\ l, t \tag{0.10}$$

$$nwd_{l,t} \cdot ndd_{l,t} = 0 \qquad \forall\ l, t \tag{0.11}$$

$$nes_{l,t} \cdot ndd_{l,t} = 0 \qquad \forall\ l, t \tag{0.12}$$

$$\left| \sum_c \lambda_{l,c,t}^{ND} \cdot R_{c(l),l} - \lambda_{l,c,t-1}^{ND} \cdot R_{c(l),l} \right| \leq \Delta_{l,t} \qquad \forall\ l, t \tag{0.13}$$

$$\Delta_{l,t} - M^2 \cdot \delta_{l,t}^2 \leq 0 \qquad \forall\ l, t \tag{0.14}$$

$$\sum_t \delta_{l,t}^2 \leq NC_l \qquad \forall\ l \tag{0.15}$$

$$\sum_c \lambda_{l,c,t}^{ND} \cdot R_{c(l),l} \ = \sum_c \lambda_{l,c,t-1}^{ES} \cdot R_{c(l),l} \qquad \forall\ l, t \tag{0.16}$$

$$\sum_c \lambda_{l,c,t}^\beta \cdot TD_{c(l),l}^\beta \ \leq J_{l,t}^{MAX,\beta} \qquad \forall\ l, t \tag{0.17}$$

$$\sum_{c} \lambda_{l,c,t}^{ND} \cdot TD_{c(l),l}^{ND} = J_{l,t}^{ND} + nwd_{l,t} - ndd_{l,t} \qquad \forall\ l,t \qquad (0.18)$$

$$\sum_{c} \lambda_{l,c,t}^{ES} \cdot TD_{c(l),l}^{ES} = J_{l,t}^{ES} + nes_{l,t} \qquad \forall\ l,t \qquad (0.19)$$

Este modelo monolítico corresponde al método global de planificación a medio plazo de la cadena de suministro considerada. Pero al tratar de un modelo con dos tipos de objetivos (uno para la elección de configuraciones de funcionamiento consistiendo en un modelo LP 0-1 y otro para la determinación de planes de producción con variables de escala muy diversa), la calibración resulta muy complicada y los resultados nunca cuadraban con las expectativas de los stakeholders y de los planificadores.

Por otra parte, el aumento de la variedad de productos aumentaba de manera exponencial los tiempos de computación razón por la cual se propone a continuación una programación secuencial por metas para resolver de manera alternativa este problema.

4. Jerarquía de objetivos del modelo de Planificación de Objetivos.

Para resolver este modelo MILP con programación secuencial por metas, se jerarquizó los objetivos en función de los costes asumidos por cada uno de los objetivos. Como el modelo era difícil de resolver, se analizaron las restricciones consideradas en cada una de las etapas de la programación y se decidió quitar, añadir o modificar las restricciones en función de las metas consideradas.

4.1. Primera meta: Minimizar los costes de cambios de calendario.

El primer objetivo que se considera es $[Obj1]: Costes\ cambios\ calendarios$. Después de varias pruebas, para determinar cambios de calendarios, resultó que la igualdad propuesta en (0.10) no era tan relevante y que los tiempos de computación eran muy condicionadas por esta igualdad. Por esta razón, se incorpora (1.1) en vez de (0.10).

$$\sum_{i} L_{l,i} \cdot x_{i,t} \leq \sum_{\beta} \sum_{c(l)} R_{c(l),l} \cdot S_{c(l)} \cdot TD_{c(l),l}^{\beta} \cdot \lambda_{l,c,t}^{\beta} \qquad \forall\ l,t \qquad (1.1)$$

Una vez esta meta optimizada, se extrae el calendario laboral de cada línea como resultado y el usuario puede validar o modificar el nuevo calendario propuesto.

4.2. Segunda meta: Minimizar los costes de maquinaria y mano de obra.

Para calcular la segunda meta $[Obj2]: Costes\ maquinaria\ y\ personal$, en el segundo sub-modelo, se considera $J_{l,t}^{\beta,new}$ tal cual lo valida el planificador:

$J_{l,t}^{\beta,new}$ = Número de días productivos calculados con el sub-modelo 1

$$J_{l,t}^{\beta,new} = J_{l,t}^{ES} + \frac{nes_{l,t}}{3} + J_{l,t}^{ND} + nwd_{l,t} - ndd_{l,t}$$

Como el calendario está calculado y que no tienen porqué existir las variables de calendario, se eliminan y se consideran las restricciones (2.1) y (2.2).

$$\sum_{c} \lambda_{l,c,t}^{ES} \cdot TD_{c(l),l}^{ES} = J_{l,t}^{ES,new} \qquad \forall \ l,t \qquad (2.1)$$

$$\sum_{c} \lambda_{l,c,t}^{ND} \cdot TD_{c(l),l}^{ND} = J_{l,t}^{ND,new} \qquad \forall \ l,t \qquad (2.2)$$

4.3. Tercera meta: Minimizar los costes de producción-inventario.

Una vez el calendario y los ritmos de producción establecidos para cada línea en cada momento, un plan detallado de producción y de necesidades se tiene que realizar. Con el fin de optimizar estos planes, se establece como tercera meta la minimización de $[Obj3]: Costes\, inventario + Costes\, complejidad + Costes\, nivelación$.

Como se calculó en la segunda meta los ritmos de producción basándose en el calendario determinado en la primera meta, se puede introducir la capacidad productiva en cada periodo con el parámetro siguiente:

$KAP_{l,t}$	=	Capacidad productiva planificada en la línea l durante la semana t calculado con los resultados del sub-modelo 2

$$KAP_{l,t} = \sum_{\beta} \sum_{c(l)} R_{c(l),l} \cdot S_{c(l)} \cdot TD_{c(l),l}^{\beta} \cdot \lambda_{l,c,t}^{\beta}$$

Y por consecuencia, se incorpora una nueva restricción de capacidad (3.1). Y para balancear correctamente los niveles de stock, se incorpora la restricción (3.2) que intentar balancear de forma equilibrada los niveles de stock de todos los productos que se fabrican en una línea.

Incorporación nuevos restricción

$$\sum_{i} L_{l,i} \cdot x_{i,t} = KAP_{l,t} \qquad \forall \ l,t \qquad (3.1)$$

$$y_{i,t} \geq SS_{i,t} \cdot \ 1 - \varepsilon_{l,t} \ \ con \ \ \varepsilon_{l,t} \leq 1 \qquad \forall \ l,t \qquad (3.2)$$

4.4. Resumen de los sub-modelos considerados en función de las metas.

Con el fin de entender la programación secuencial por metas que se plantea en este artículo, se propone a continuación una tabla resumen que refleja para cada modelo los objetivos y las restricciones implementadas.

Al final de dicha tabla, se presenta también el número de variables totales y enteras así como el número de restricciones en cada modelo.

Tabla 11. Tabla resumen de las características de cada modelo.

		Modelo Monolitico	Sub-Modelo 1	Sub-Modelo 2	Sub-Modelo 3
Función Objetivo :					
	Obj1				
	Obj2				
	Obj3				
Restricciones :					
	0.1				
	0.2				
	0.3				
	0.4				
	0.5				
	0.6				
	0.7				
	0.8				
	0.9				
	0.10				
	0.11				
	0.12				
	0.13				
	0.14				
	0.15				
	0.16				
	0.17				
	0.18				
	0.19				
Restricciones modificadas para la programación por metas					
	1.1				
	2.1				
	2.2				
	3.1				
	3.2				
Número de variables		41925	38750	38200	5875
Variables enteras		37250	35400	35425	1550
Número de restricciones		7812	2875	2424	6163

5. Resolución de los modelos

Para la validación del modelado, se ha fijado junto con los stakeholders y los planificadores una jerarquía de los objetivos. Esta jerarquía se definió en base a las implicaciones financieras sujetas a estas metas pero también a los costes de oportunidad que se han evaluado.

Para la resolución, el modelo se ejecuta en cada etapa con un único objetivo. Cada una de las variables de decisión dentro de las funciones objetivos hace referencia a elementos comparables. Dentro de cada función objetivo, los diferentes costes que no conocían en si han sido determinados con coeficiente de peso relativo para cumplir con las expectativas de los planificadores y stakeholders. Cuando se optimiza el modelo con la minimización o maximización de una meta, una nueva restricción se introduce en el modelo con el nivel elegido de holgura (variando en función de su naturaleza) y se resuelve el modelo siguiente con otra meta y con la introducción de nuevas restricciones (en el caso oportuno) hasta llegar a la ultima meta.

Con el fin de reducir los tiempos de resolución, se determina para cada meta cuales son las restricciones que se pueden quitar del modelo monolítico con el fin de minimizar la complejidad de los modelos en cada momento.

Frente a un modelo tradicional, la resolución se realiza con el número mínimo de restricciones, variables y de datos. Eso quiere decir que en función de la meta (de las variables implicadas en la función objetivo), se introducen nuevas restricción cuando son necesarias Esto permite gracias a la disminución de la complejidad de los modelos, una resolución más rápida siempre cumpliendo las expectativas del planificador.

Además, debido a la similitud de la naturaleza de las variables dentro de cada meta, como una gran parte de los costes son de oportunidad, se puede escalar los costes de manera más en adecuación con los resultados esperados de los planificadores.

6. Conclusiones

En este articulo, se presenta un modelo MILP con programación secuencial por metas para la planificación maestra de todas las líneas de una planta de ensamblaje de motores. Gracias a una jerarquía definida con los propios planificadores y stakeholders, este modelo implementado dentro de un DSS permite la planificación maestra de forma semanal.

En el artículo completo, se compara el comportamiento del modelo de programación multi-objetivo contra un modelo centralizado global. Se demuestra que al introducir únicamente las restricciones influyentes (agregándolo al modelo) y a optimizar una única meta, se consigue como resultado una solución comparable en un tiempo menor y validada por los usuarios.

Una futura línea de investigación consistirá en la introducción de la incertidumbre en la demanda ya que desde la última crisis económica, la demanda se ve muy afectada y uno de los objetivos proponer escenarios para disminuir la nervosidad de la planificación.

Referencias

Christopher, M. (1998). Logistics and Supply Chain Management - Strategies for reducing Cost and Improving service, 2nd Edition ed.

Christopher, M.; Towill, D. R. (2000). Supply chain migration from lean and functional to agile and customised. Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 5, nº. 4, pp. 206-213.

Fleischmann, B.; Ferber, S.; Henrich, P. (2006). Strategic Planning of BMW's Global Production Network. Interfaces, Vol. 36, nº. 3, pp. 194-208.

Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. J. (2009a). A Decision Support System for Aggregate Production Planning based on MILP: A Case Study from the Automotive Industry, in 39th International Conference on Computers & Industrial Engineering, pp. 366-371.

Garcia-Sabater, J. P., Maheut, J., & Garcia-Sabater, J. J. (2009b). Mid-Term Production Planning System. A Case Study of an Engine Assembler, in 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, pp. 804-813.

Haugh, D.; Mourougane, A.; Chatal, O. (2010). The Automobile Industry in and Beyond the Crisis. OECD Economics Department Working Papers, Vol. No. 745.

Lloret, J.; Garcia-Sabater, J. P.; Marin-Garcia, J. A. (2009). Cooperative Supply Chain Re-scheduling: The Case of an Engine Supply Chain, en B. Springer (dir), Lecture Notes in Computer Science, Volume 5738/2009, pp. 376-383.

Meyr, H.; Wagner, M.; Rohde, J. (2005). Structure of Advanced Planning Systems, en H. Staedtler y C. Kilger (dir), Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies, pp. 109-115. Springer.

Monden, Y. (1981). Production Smoothing. Industrial Engineering, Vol. August, pp. 42-51.

Olhager, J.; Rudberg, M.; Wikner, J. (2001). Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. International Journal of Production Economics, Vol. 69, nº. 2, pp. 215-225.

Taylor, S. J. E., Behli, L., Wang, X., Turner, S. J., & Ladbrook, J. (2005). Investigating distributed simulation at the Ford motor company, IEEE.

Wang, R. C.; Liang, T. F. (2004). Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. Computers & Industrial Engineering, Vol. 46, nº. 1, pp. 17-41.

Wang, S.; Sarker, B. R. (2005). An assembly-type supply chain system controlled by kanbans under a just-in-time delivery policy. European Journal of Operational Research, Vol. 162, nº. 1, pp. 153-172.

Whitney, D.; Peschard, G.; Artzner, D. (2001). Cost and efficiency performance of automobile engine plants. International Motor Vehicle Program, Working Papers, Massachusetts Institute of technology.

Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D. (1990). The Machine that Change the World, Harper Pernnial, New York ed. Macmillan

Xu, L.; Beamon, B. M. (2006). Supply chain coordination and cooperative mechanisms: an attribute-based approach. The Journal of Supply Chain Management, Vol. 42, nº. 1, pp. 4-12.