CIO 2012 VIGO

July 18 - 20, 2012

6TH International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management

XVI CONGRESO DE INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN

Book of Full Papers

Libro de Comunicaciones

Industrial Engineering: Overcoming the Crisis

Tittle/Título de la obra:
"Industrial Engineering: Overcoming the Crisis". Book of Full Papers of the 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management – XVI Congreso de Ingeniería de Organización.

© Executive Editors/Editores:
José Carlos Prado Prado
Jesús García Arca
José Antonio Comesaña Benavides
Arturo José Fernández González

Grupo de Ingeniería de Organización
Universidad de Vigo
Escuela de Ingeniería Industrial, sede Campus
Cl Maxwell, s/n – Campus Lagoas-Marcosende
36310 Vigo (Pontevedra)

Design and Editing / Diseño y Edición:
Reprogalicia, S.L.

Legal Deposit/Depósito Legal: VG 549-2012

ISBN: 978-84-938642-5-5

SP-08. Lean Manufacturing y Mejora Contiínua

SPECIAL TRACKS 1543

ST-02. Líneas de Producción y Montaje. Problemas de Equilibrado y Secuenciación

6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management.
XVI Congreso de Ingeniería de Organización. Vigo, July 18-20, 2012

Incorporando regularidad del trabajo requerido al MMSP con mínima sobrecarga

Joaquín Bautista[1], Alberto Cano[1], Rocío Alfaro[1]

Abstract We present a mathematical model for a variant of Mixed-Model Sequencing Problem (*MMSP*) with minimal work-overload and constant maintenance of required work rate. We performed a computational experience with reference instances from the literature using Mixed Integer Linear Programming (*MILP)*.

Resumen Se presenta un modelo matemático para una variante del problema Mixed-Model Sequencing (*MMSP*) minimizando la sobrecarga y manteniendo constante la tasa del trabajo requerido. Se realiza un experimento con ejemplares de referencia de la literatura empleando Programación Lineal Entera Mixta.

Keywords: Regular Sequences, Work Overload, Mixed-Integer Linear Programming.

Palabras clave: Secuencias regulares, Sobrecarga, Programación Lineal Entera Mixta.

1.1 Introducción

En los sistemas de fabricación gestionados por las ideologías Just-in-Time (*JIT*) y Douki Seisan (*DS*) son muy comunes las líneas de producción de artículos mixtos.

En dichas líneas pueden fabricarse o ensamblarse diversos artículos: variantes de uno o más productos (carrocerías, motores, vehículos, etc.). Esta flexibilidad,

---

[1] J. Bautista (✉), R. Alfaro, A. Cano
Cátedra Prothius, Universitat Politècnica de Catalunya, Avda. Diagonal 647, 7ª planta, 08028 Barcelona, España
e-mail: {joaquin.bautista, alberto.cano-perez, rocio.alfaro}@upc.edu
URL: http://www.prothius.com (J.Bautista).
Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España bajo el proyecto DPI2010-16759 (PROTHIUS-III) incluyendo fondos FEDER.

deseable a la hora de producir, condiciona el orden en que deben fabricarse los artículos, puesto que el requerimiento de materiales y del trabajo a desempeñar por los recursos humanos depende de la variante del producto. En estos entornos, aparecen tres clases de problemas de secuenciación de productos mixtos (Boysen et al., 2009): (1) Mixed-model sequencing, (2) Car sequencing and (3) Level scheduling. A la primera clase de problemas pertenece el Mixed-Model Sequencing Problem with Workload Minimisation (*MMSP-W*).

El *MMSP-W* (Yano y Rachamadugu, 1991; Scholl et al., 1998) consiste en secuenciar T productos, de los cuales d_i son de tipo i ($i = 1,\ldots,|I|$). Un producto de tipo i requiere a cada procesador (operario, robot, etc.) de la estación de trabajo k ($k = 1,\ldots,|K|$) un tiempo de proceso $p_{i,k}$ medido a actividad normal. El tiempo normal concedido a cada procesador para trabajar sobre un producto se llama tiempo de ciclo c. Cuando finaliza un ciclo en la estación k, se puede trabajar sobre el producto en curso un tiempo adicional positivo $l_k - c$, siendo l_k el tiempo de ventana. Cuando no es posible completar el trabajo requerido por el plan de demanda, se dice que se genera sobrecarga. El objetivo del problema es maximizar el trabajo total completado que equivale a minimizar la sobrecarga total generada (ver teorema 1 en Bautista y Cano, 2011).

Por otra parte, la concentración de la sobrecarga, dependiente de la secuencia de productos, en ciclos consecutivos de la jornada laboral es una cualidad no deseable. Para evitar lo anterior, conviene programar secuencias de productos que propicien la regularidad de la carga de trabajo requerido a lo largo del tiempo en todas las estaciones de la línea. Esta propiedad da lugar a un nuevo problema cuyo objetivo es minimizar la variación de las tasas del trabajo requerido en todas las estaciones durante la fabricación de los productos.

Nuestra propuesta se estructura como sigue. En la sección 1.2 se presentan las bases para obtener secuencias en las que se mantengan, lo más constantes posible, las tasas del trabajo requerido en las estaciones de la línea. En la sección 1.3 se propone una extensión al modelo propuesto en (Bautista et al., 2011) para el *MMSP-W*, añadiendo el objetivo de minimizar la no-regularidad del trabajo requerido. En 1.4 realizamos un experimento, empleando el solver Gurobi, con 225 instancias de referencia de la literatura (Bautista y Cano, 2008). Finalmente, se recogen algunas conclusiones sobre este trabajo en la sección 1.5.

1.2 Regularidad del Trabajo Requerido. Conceptos Básicos

Para evitar la concentración de sobrecarga de trabajo en ciclos consecutivos de la jornada laboral, proponemos programar secuencias de productos que presenten la propiedad de regularidad del trabajo requerido en las estaciones a lo largo del tiempo. El presente apartado lo dedicamos a establecer las bases para poder incorporar esta propiedad a los modelos matemáticos relativos al *MMSP-W*.

En primer lugar, consideremos el tiempo medio del trabajo requerido en la estación k por una unidad de producto, que es equivalente al tiempo de proceso de una unidad ideal en la estación k con b_k procesadores disponibles. Sea $\dot{p}_k$ dicho tiempo medio, al que llamaremos tasa ideal del trabajo requerido para la estación k $(k = 1,\ldots,|K|)$ y lo determinaremos así:

$$\dot{p}_k = \frac{b_k}{T}\sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot d_i \qquad \forall k = 1,\ldots,|K| \tag{1.1}$$

Consideremos, también, el tiempo medio del trabajo requerido en la estación k cuando por ella pasan t unidades de producto siguiendo el orden establecido por la secuencia $\pi(t) = \{\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_t\}$. Sea $\overline{p}_{k,t}$ dicho tiempo, lo llamaremos tasa real del trabajo requerido en la estación k $(k = 1,\ldots,|K|)$ asociado a secuencia $\pi(t)$ y se determina así:

$$\overline{p}_{k,t} = \frac{b_k}{t}\sum_{\tau=1}^{t} \rho_{k,\tau} = \frac{b_k}{t}\sum_{\tau=1}^{t} p_{\pi_\tau, k} \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.2}$$

Donde $\rho_{k,\tau}$ es el tiempo de proceso requerido a cada procesador de la estación de trabajo k por la τ-ésima unidad de la secuencia $\pi(t)$ de productos.

Las definiciones anteriores permiten formular las discrepancias entre las tasas reales e ideales del trabajo requerido de la forma siguiente:

$$\delta_{k,t}(p) = \overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.3}$$

Dichas discrepancias pueden adoptar tanto un valor positivo $\delta^+_{k,t}$ (exceso de trabajo requerido) como negativo $\delta^-_{k,t}$ (defecto de trabajo requerido) y se definen así:

$$\delta^+_{k,t} = \overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.4}$$

$$\delta^-_{k,t} = \dot{p}_k - \overline{p}_{k,t} \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.5}$$

Lógicamente, se cumplen las siguientes igualdades:

$$\overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k = \delta^+_{k,t} - \delta^-_{k,t} \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.6}$$

Finalmente, en los modelos se debe imponer explícita o implícitamente las condiciones que siguen :

$$Si \quad \delta^+_{k,t} > 0 \quad \Rightarrow \quad \delta^-_{k,t} = 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.7}$$

$$Si \quad \delta^-_{k,t} > 0 \quad \Rightarrow \quad \delta^+_{k,t} = 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \tag{1.8}$$

1.3 Modelo para el MMSP-W con Regularidad del Trabajo Requerido

Con los elementos definidos en el apartado anterior, podemos extender el modelo *M4’* (ver Bautista et al., 2011) contemplando, ahora, la regularidad del trabajo requerido. Los parámetros, variables y formulación del modelo propuesto se presentan a continuación.

Parámetros

K	Conjunto de estaciones de trabajo $(k=1,\ldots,\vert K\vert)$
b_k	Número de procesadores homogéneos en cada estación de trabajo k $(k=1,\ldots,\vert K\vert)$
I	Conjunto de tipos de producto $(i=1,\ldots,\vert I\vert)$
d_i	Demanda programada del tipo de producto i
$p_{i,k}$	Tiempo de proceso requerido a cada procesador homogéneo (*en actividad normal*), por una unidad de producto de tipo i en la estación k $(k=1,\ldots,\vert K\vert)$
T	Demanda total. Obviamente: $\sum_{i=1}^{\vert I\vert} d_i = T$
t	Índice de posición en la secuencia ($t=1,\ldots,T$)
c	Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a cada procesador de las estaciones de trabajo, $k=1,\ldots,\vert K\vert$, para tratar cualquier unidad de producto.
l_k	Ventana temporal. Tiempo máximo que se le permite, a cada procesador de la estación k, trabajar en cualquier unidad de producto; siendo $l_k - c > 0$ el tiempo máximo que se puede retener una unidad de producto, en la estación k, una vez concluido el ciclo.
$\dot{p}_k$	Tasa ideal del trabajo requerido para la estación k $(k=1,\ldots,\vert K\vert)$ con b_k procesadores disponibles.
α	Coeficiente de ponderación de la sobrecarga total frente a la función de no-regularidad del trabajo requerido $(0 \le \alpha \le 1)$.

Variables

$x_{i,t}$	Variable binaria que adopta el valor 1 si una unidad del producto i $(i=1,\ldots,\vert I\vert)$ se asigna a la posición t $(t=1,\ldots,T)$ de la secuencia, y valor 0 en caso contrario.
$s_{k,t}$	Instante de inicio del trabajo aplicado a la *t-ésima* unidad de la secuencia de productos en la estación k $(k=1,\ldots,\vert K\vert)$
$w_{k,t}$	Sobrecarga generada en cada procesador homogéneo (*en actividad normal*), medida en tiempo, por la *t-ésima* unidad de producto secuenciada en la estación de trabajo k.
$\hat{s}_{k,t}$	Diferencia positiva entre el instante de inicio real y el mínimo instante de inicio de la *t-ésima* operación en la estación de trabajo k. Se cumple $\hat{s}_{k,t} = [s_{k,t} - (t-1)c]^+$ (con $[x]^+ = \max\{0, x\}$).

$\rho_{k,t}$ Tiempo de proceso requerido a cada procesador por la *t-ésima* unidad de la secuencia de productos en la estación de trabajo k.

$\overline{p}_{k,t}$ Tasa real del trabajo requerido por los t primeros productos en la estación k con b_k procesadores disponibles.

$\delta^{+}_{k,t}$ Discrepancia positiva entre las tasa real e ideal del trabajo requerido en la estación k para los t primeros productos.

$\delta^{-}_{k,t}$ Discrepancia negativa entre las tasa real e ideal del trabajo requerido en la estación k para los t primeros productos.

Modelo *M4'_RWR:*

$$Min \ \ \Phi(\alpha) = \alpha \cdot W + (1-\alpha)\Delta_P = \alpha\left[\sum_{k=1}^{|K|}\left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t}\right)\right] + (1-\alpha)\left[\sum_{k=1}^{|K|}\sum_{t=1}^{T}\left(\delta^{+}_{k,t} + \delta^{-}_{k,t}\right)\right] \qquad (1.9)$$

sujeto a:

$$\sum\nolimits_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad \forall i = 1,\ldots,|I| \qquad (1.10)$$

$$\sum\nolimits_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.11)$$

$$\rho_{k,t} = \sum\nolimits_{i=1}^{|I|} p_{i,k}\, x_{i,t} \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.12)$$

$$\rho_{k,t} - w_{k,t} \geq 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.13)$$

$$\overline{p}_{k,t} = \frac{b_k}{t}\sum_{\tau=1}^{t} \rho_{k,t} \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.14)$$

$$\delta^{-}_{k,t} - \delta^{+}_{k,t} + \overline{p}_{k,t} = \dot{p}_k \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.15)$$

$$\hat{s}_{k,t} \geq \hat{s}_{k,t-1} + \rho_{k,t-1} - w_{k,t-1} - c \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 2,\ldots,T \qquad (1.16)$$

$$\hat{s}_{k,t} \geq \hat{s}_{k-1,t} + \rho_{k-1,t} - w_{k-1,t} - c \qquad \forall k = 2,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.17)$$

$$\hat{s}_{k,t} + \rho_{k,t} - w_{k,t} \leq l_k \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.18)$$

$$\hat{s}_{k,t} \geq 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.19)$$

$$w_{k,t} \geq 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.20)$$

$$\delta^{+}_{k,t} \geq 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.21)$$

$$\delta^{-}_{k,t} \geq 0 \qquad \forall k = 1,\ldots,|K|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.22)$$

$$x_{i,t} \in \{0,1\} \qquad \forall i = 1,\ldots,|I|;\ \forall t = 1,\ldots,T \qquad (1.23)$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \qquad (1.24)$$

En el modelo *M4'_RWR*, la función objetivo (1.9) expresa la minimización de la función de esfuerzo $\Phi(\alpha)$ que pondera dos funciones mediante el coeficiente α $(0 \leq \alpha \leq 1)$; la primera función, W corresponde a la sobrecarga total de trabajo y la segunda, Δ_P, representa la suma de excesos y defectos de trabajo requerido respecto a la tasa ideal de requerimiento, o sea, la no-regularidad del trabajo requerido. Las ecuaciones (1.10) y (1.11) representan la satisfacción de la demanda y la asignación de productos a las posiciones de la secuencia, respectivamente. Las restricciones (1.12) y (1.13) establecen los vínculos entre los tiempos de proceso requeridos por los productos en las estaciones con los correspondientes a las unidades ordenadas en secuencia, dicha ordenación limita los valores de las sobrecargas. En (1.14) se definen las tasas reales de trabajo requerido, mientras que en

(1.15) se relacionan dichas tasas con las ideales y con las discrepancias entre ellas. Las restricciones (1.16) a (1.18) sirven para determinar los instantes relativos de inicio de las operaciones. La no negatividad de las variables se establece con las inecuaciones (1.19) a (1.22). La cualidad binaria de las variables de asignación se formula en (1.23). Finalmente, en (1.24) se fija el instante de inicio de las operaciones.

1.4 Experiencia Computacional

En este experimento, se emplean 225 instancias de referencia (ver Bautista y Cano, 2008; Bautista y Cano, 2011), con 45 planes de demanda agrupados en 5 bloques (*B*), y 5 estructuras (*E)* de tiempos de proceso. Cada instancia se ha resuelto dando siete valores al parámetro de ponderación α, éstos son: 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 y 1. Para obtener las soluciones óptimas de las instancias a partir del modelo *M4'_RWR*, se ha empleado el solver Gurobi v4.6.1 ejecutándose en un ordenador Apple Macintosh iMac con un procesador Intel Core i7 2.93 GHz , 8 GB de memoria RAM y el sistema operativo MAC OS X 10.6.7.

Los resultados del experimento se recogen en las tablas 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1 Tiempos de CPU mínimo, máximo y promedio (segundos) para obtener los óptimos de las 225 instancias con el modelo *M4'_RWR* en función del coeficiente de ponderación α.

α	1.00	0.80	0.60	0.50	0.40	0.20	0.00
CPU min	0.02	1.10	1.16	1.03	1.18	1.02	0.55
CPU max	1750.64	3737.33	2578.40	1962.75	1095.92	630.03	30.61
$\overline{CPU}$	57.68	180.58	127.25	104.47	76.08	44.50	10.76

En la tabla 1.1, se observa una reducción progresiva de los tiempos de CPU promedios a medida que decrece el coeficiente de ponderación α en el rango de valores comprendidos entre 0.80 y 0.00; dicha reducción promedio corresponde, aproximadamente, a una dieciochoava parte (180.58 s. versus 10.76 s.). No obstante, esta tendencia se altera para $\alpha = 1$, pues se observa que el tiempo de CPU promedio es menor que el que corresponde a $\alpha = 0.8$ (57.68 s. versus 180.58 s.), este hecho se puede deber a que, en el caso $\alpha = 1$, se eliminan implícitamente las variables de discrepancia positiva y negativa en el proceso de optimización, al quedar todas multiplicadas por 0 en la función objetivo. Por otra parte, atendiendo a los tiempos máximos de CPU, podemos ver que presentan una tendencia semejante, para los distintos valores de α, a la que muestran los tiempos promedio.

Sobre la calidad de las soluciones que resultan de la explotación de *M4'_RWR*, se parte de las soluciones óptimas de los 225 ejemplares, conseguidas con Gurobi, con $\alpha = 1$ (mínima W) y $\alpha = 0$ (mínima Δ_P). Acto seguido, con dichas soluciones se determinan dos tipos de desviación porcentual relativa para cada instancia. La primera, $RPD_W(\alpha) = 100 \cdot (W^*(\alpha) - W^*)/W^*$, donde W^* es la sobrecarga total óptima cuando $\alpha = 1$ en *M4'_RWR* y $W^*(\alpha)$ es el valor óptimo de la sobrecarga total cuando $\alpha \neq 1$. La segunda es $RPD_{\Delta_P}(\alpha) = 100 \cdot (\Delta_P{}^*(\alpha) - \Delta_P{}^*) / \Delta_P{}^*$, siendo $\Delta_P{}^*$ el valor óptimo de la no-regularidad del trabajo requerido cuando $\alpha = 0$ en *M4'_RWR* y $\Delta_P{}^*(\alpha)$ es el valor óptimo de esta función con $\alpha \neq 0$.

Tabla 1.2 Valores de RPD_W y RPD_{Δ_P} por estructuras, bloques y promedio ($\overline{RPD}$) de las 225 instancias, para las soluciones de *M4'_RWR* en función del coeficiente de ponderación α.

	α	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*	*E5*	*B1*	*B2*	*B3*	*B4*	*B5*	$\overline{RPD}$
$RPD_W(\alpha)$	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.8	1.64	1.10	0.56	0.01	1.40	0.00	0.87	1.42	1.31	0.92	0.94
	0.6	3.77	1.91	1.28	0.03	2.88	0.04	1.22	3.21	3.09	1.94	1.97
	0.5	4.89	2.66	1.82	0.03	3.60	0.16	1.57	4.15	3.75	2.62	2.60
	0.4	5.73	4.05	2.67	0.06	5.36	0.27	2.08	6.16	4.96	3.51	3.57
	0.2	10.90	9.39	4.66	0.15	9.42	0.60	5.71	13.01	6.27	6.58	6.90
	0.0	34.64	23.31	8.35	0.38	26.84	1.79	11.87	36.54	22.55	17.39	18.70
$RPD_{\Delta P}(\alpha)$	1.0	48.94	38.09	51.49	47.40	38.29	50.69	45.86	51.61	45.47	41.53	44.84
	0.8	13.14	10.85	11.07	0.62	10.85	1.76	6.30	13.62	12.60	9.51	9.31
	0.6	6.82	7.44	6.52	0.38	6.16	1.47	3.99	8.13	5.82	5.66	5.46
	0.5	5.06	6.04	4.81	0.33	4.86	1.26	2.94	6.59	4.76	4.25	4.22
	0.4	4.13	4.42	3.00	0.24	3.43	1.02	2.42	4.49	2.78	3.16	3.05
	0.2	2.00	1.35	0.81	0.04	1.79	0.39	0.78	1.94	1.96	1.09	1.20
	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

En la tabla 1.2 observamos los siguientes hechos.

Primero, se produce un empeoramiento medio en sobrecarga total (W) que aumenta en progresión, en todas las estructuras de tiempo y en todos los bloques de demanda, a medida que disminuye el valor del coeficiente de ponderación α.

Segundo, se produce una mejora media en los valores de la función de no-regularidad del trabajo requerido (Δ_P) que disminuye progresivamente, en todas las estructuras y bloques, en sintonía con la disminución α.

Tercero, la estructura *E4* se muestra como la más estable ante la variación del coeficiente α en el rango de valores 0.0 a 0.8, tanto para los valores de $RPD_W(\alpha)$ como para los de $RPD_{\Delta_P}(\alpha)$, mientras que en el resto de estructuras se detectan unos valores similares para $RPD_{\Delta_P}(\alpha)$ y algo más dispersos para $RPD_W(\alpha)$.

Cuarto, el bloque de planes de demanda *B1* es el más estable frente al resto de bloques. Para el rango de valores de α comprendido entre 0.0 y 0.8, un empeoramiento medio en W del 1.79% supone una mejora media en Δ_P del 1.76%.

Quinto, considerando los valores promedio, el empeoramiento medio de la sobrecarga global es cercano al 19% y se convierte en una mejora de la no-regularidad del trabajo requerido cercana al 45%, pasando por puntos intermedios como el 2.60% de empeoramiento para W con un 40.62% de mejora para Δ_P y alcanzándose el mejor compromiso para α igual a 0.4 y 0.5.

1.5 Conclusiones

Hemos presentado el modelo *M4'_RWR* asociado al problema Mixed Model Sequencing (*MMS*) con estaciones en serie, con libre interrupción de operaciones, con minimización de la sobrecarga de trabajo y manteniendo, lo más constante posible, la tasa del trabajo requerido en las estaciones de la línea. Dicho modelo es una extensión del modelo *M4'* propuesto en Bautista et al., 2011.

Para el nuevo problema, se ha optado por la programación lineal entera mixta (*MILP*) como procedimiento de resolución; para ello, se ha empleado el solver Gurobi v4.6.1. en una experiencia computacional compuesta por 225 instancias de referencia en la literatura. En dicha experiencia se han obtenido los óptimos de las 225 instancias para siete valores del coeficiente α que pondera la sobrecarga total de trabajo (W) frente a la no-regularidad del trabajo requerido (Δ_P).

Los tiempos medios de CPU para alcanzar los óptimos dependen claramente del valor que se asigna al coeficiente de ponderación α, oscilando entre 10.76 s. 180.58 s por instancia.

Con la incorporación de la función Δ_P al modelo original, en el caso más extremo se genera un empeoramiento medio en sobrecarga global del 18.70% cuando se consigue una ganancia en regularidad del trabajo requerido del 44.84%.

1.6 Referencias

Bautista J and Cano J (2008) Minimizing work overload in mixed-model assembly lines. International Journal of Production Economics, 112/1:177-191.

Bautista J and Cano A (2011) Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules. European Journal of Operational Research, 210/3:495-513.

Bautista J, Cano A, Alfaro R (2011) A bounded dynamic programming algorithm for the MMSP-W considering workstation dependencies and unrestricted interruption of the operations, Proceedings(CD). ISBN: 978-1-4577-1675-1, 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2011), Córdoba, Spain.

Boysen N, Fliedner M and Scholl A (2009) Sequencing mixed-model assembly lines: survey, classification and model critique. European Journal of Operational Research, 192/2:349-373.

Scholl A, Klein R and Domschke W (1998) Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed-model assembly lines. Journal of Heuristics, 4/4:359-381.

Yano CA, and Rachamadugu R (1991) Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. Management Science, 37/5:572-586.