

XII CONGRESO ESPAÑOL DE METAHEURÍSTICAS, ALGORITMOS EVOLUTIVOS Y BIOINSPIRADOS (MAEB 2017)
Universitat Pompeu Fabra · Barcelona 4 a 7 de julio 2017

GRASP para secuencias regulares de modelos mixtos con sobrecarga mínima e interrupción forzada de operaciones

Joaquín Bautista · Rocío Alfaro

Research Group OPE-PROTHIUS · Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) ·

Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC)

OPE-PROTHIUS – OPE-Conf.2017/01 (20170705) - <http://futur.upc.edu/OPE> - www.prothius.com -



PROTHIUS
Càtedra Organització Industrial

MAEB'17 – MMSP-W-pmr 0

J Bautista · R Alfaro

Contenido

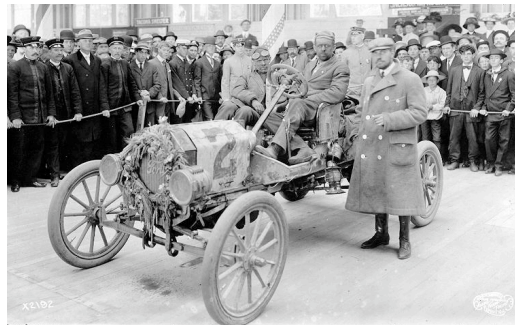
- Antecedentes
- Introducción
- Líneas de modelos mixtos. Secuencias
- Modelo. Nomenclatura
- Modelo: MMSP-W/ Δ_{QX} /pmr/forced . Formulación
- Caso de Estudio
- GRASP-2 · Fase 1: Construcción de una secuencia
- GRASP-2 · Fase 2: Mejora mediante búsqueda local
- Experimento. Condiciones y métricas
- Resultados · Sobrecarga
- Resultados · No-regularidad
- Conclusiones



Antecedentes



Producción Artesanal



Producción Industrial



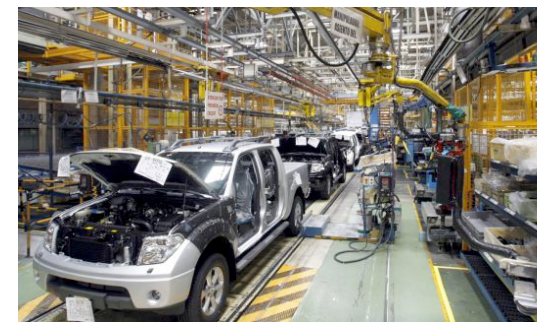
Producción en Cadena



Producción Flexible



Producción JIT



Producción Actual

+ PRODUCCIÓN

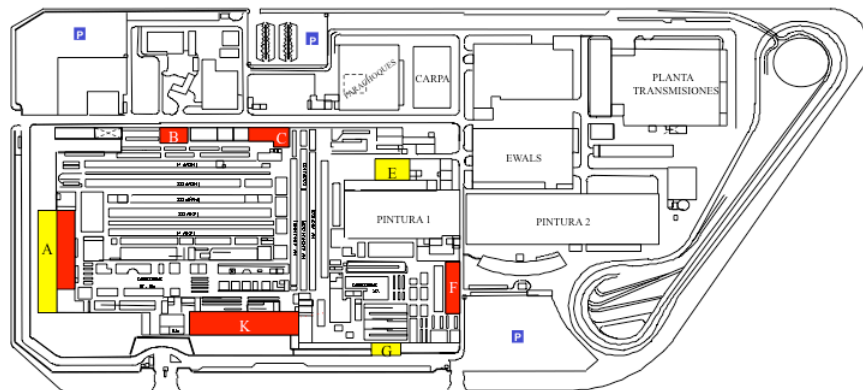
+ EFICIENCIA

+ FLEXIBILIDAD

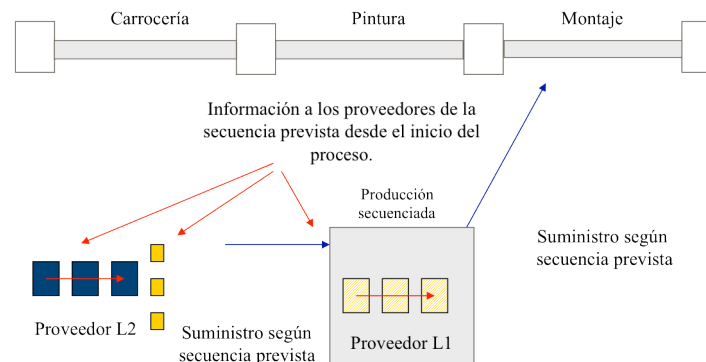
- COSTES



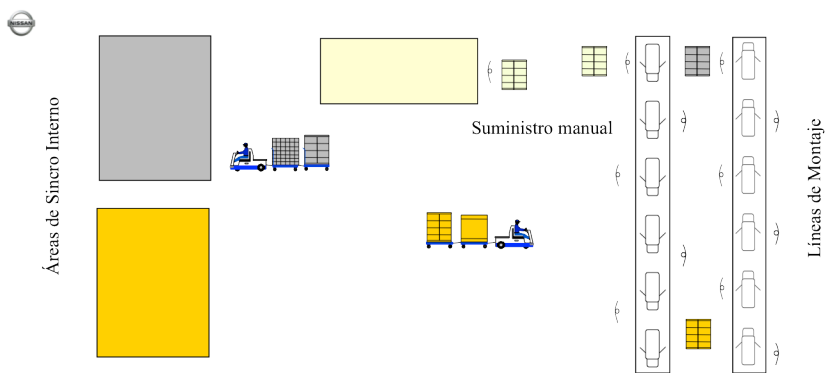
Introducción



Planta de fabricación Nissan-BCN



Procesos: Body Shop, Paint Shop, Trim & Chasis.



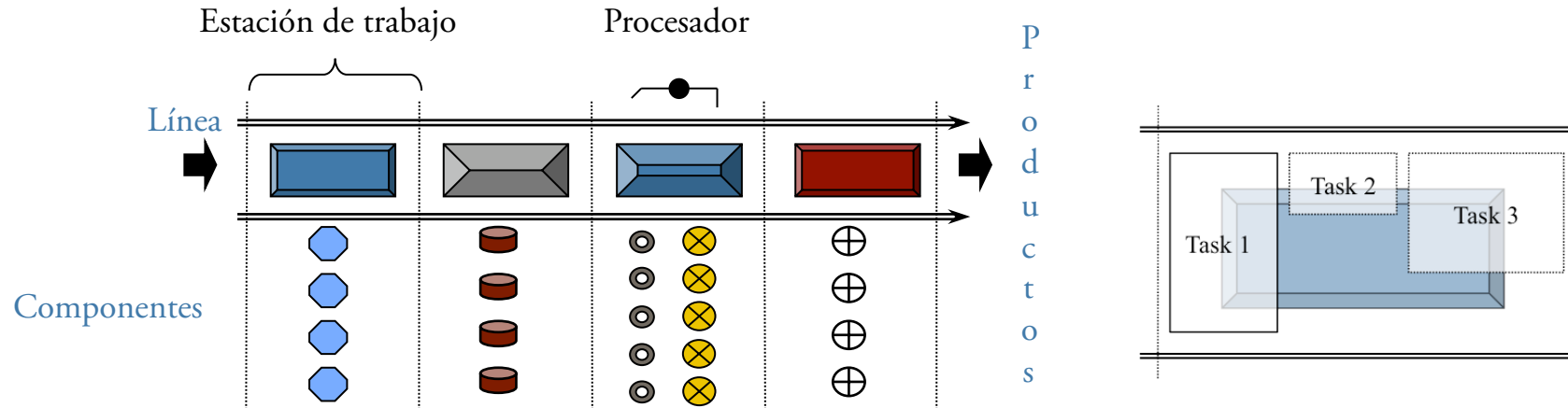
Suministro a líneas. Logística Interna



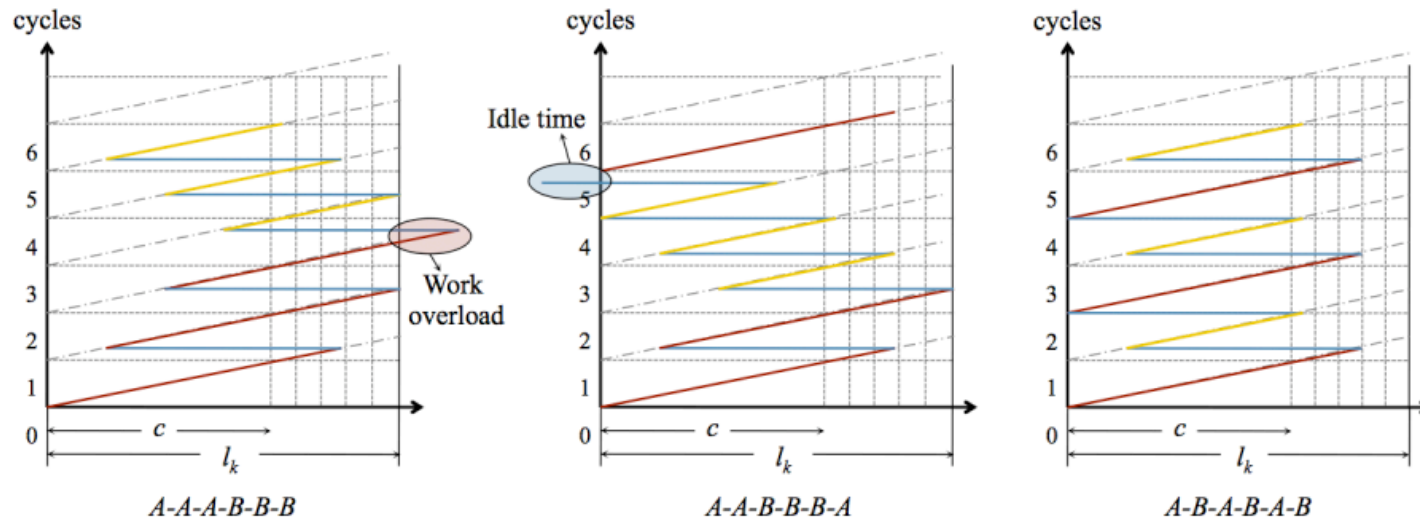
Ejemplos de líneas objeto de estudio



Líneas de modelos mixtos. Secuencias



Problemas de secuencias: LS (Level Scheduling), CSP (Car Sequencing), MMSP-W (Workoverload)



Modelo. Nomenclatura

Elementos: Parámetros y variables

I, K	Conjunto de productos ($I: i = 1, \dots, I $) · Conjunto de estaciones ($K: k = 1, \dots, K $)
$\vec{d}, \vec{\lambda}$	Vector demanda: $\vec{d} = (d_1, \dots, d_{ I })$ · Vector mix de producción $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_{ I })$
T, t	Demanda total · Índice de posición del producto en la secuencia ($t = 1, \dots, T$)
c, l_k	Tiempo de Ciclo · Ventana temporal de la estación $k \in K$
$p_{i,k}$	Tiempo de proceso de $i \in I$ en la estación $k \in K$
$\pi(T)$	Secuencia global de productos: $\pi(T) = (\pi_1, \dots, \pi_T)$
$\pi(t)$	Secuencia parcial de productos: $\pi(t) = (\pi_1, \dots, \pi_t) \subseteq \pi(T)$
$X_{i,t}$	Unidades de tipo $i \in I$ contenidas en la secuencia $\pi(t) = (\pi_1, \dots, \pi_t) \subseteq \pi(T)$
$W(\pi(T))$	Sobrecarga de la secuencia $\pi(T)$
$U(\pi(T))$	Tiempo inerte de la secuencia $\pi(T)$
$w_{k,t}(\pi_t)$	Sobrecarga generada por la t -ésima unidad de $\pi(T)$ en la estación $k \in K$
$u_{k,t}(\pi_t)$	Tiempo inerte generado por la t -ésima unidad de $\pi(T)$ en la estación $k \in K$
$s_{k,t}(\pi_t)$	Instante de inicio de la t -ésima unidad de $\pi(T)$ en la estación $k \in K$
$e_{k,t}(\pi_t)$	Instante de finalización de la t -ésima unidad de $\pi(T)$ en la estación $k \in K$
$e_{k-1,t}(\pi_t)$	Instante de finalización de la t -ésima unidad de $\pi(T)$ en la estación $(k - 1) \in K$



Modelo: MMSP-W/ Δ_{Q_X} /pmr/forced . Formulaci3n

Relaciones: Objetivos, ecuaciones y restricciones

$$\min \mathcal{F}(\pi(T)) \equiv W(\pi(T)) < \Delta_{Q_X}(\pi(T)) \quad 1$$

$$W(\pi(T)) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{|K|} b_k w_{k,t}(\pi_t) \quad 2$$

$$U(\pi(T)) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{|K|} b_k u_{k,t}(\pi_t) \quad 3$$

$$\Delta_{Q_X}(\pi(T)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{|I|} (X_{i,t} - \lambda_{i,t})^2 \quad 4$$

$$w_{k,t}(\pi_t) = \max(0, s_{k,t}(\pi_t) + p_{\pi_t,k} - (k + t - 2)c - l_k) \quad \forall k \in K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 5$$

$$u_{k,t}(\pi_t) = s_{k,t}(\pi_t) - e_{k,t-1}(\pi_{t-1}) \quad \forall k \in K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 6$$

$$X_{i,t} = |\{\pi_\tau \in \pi(t) = (\pi_1, \dots, \pi_t) \subseteq \pi(T) : \pi_\tau = i \in I\}| \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 7$$

$$s_{k,t}(\pi_t) = \max(e_{k,t-1}(\pi_{t-1}), e_{k-1,t}(\pi_t), (k + t - 2)c) \quad \forall k \in K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 8$$

$$e_{k,t-1}(\pi_{t-1}) = s_{k,t-1}(\pi_{t-1}) + p_{\pi_{t-1},k} - w_{k,t-1}(\pi_{t-1}) \quad \forall k \in K \quad \forall t = 2, \dots, T \quad 9$$

$$e_{k-1,t}(\pi_t) = s_{k-1,t}(\pi_t) + p_{\pi_t,k-1} - w_{k-1,t}(\pi_t) \quad \forall k \in K - \{1\} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 10$$

$$e_{k,t}(\pi_t) = \min(s_{k,t}(\pi_t) + p_{\pi_t,k}, (k + t - 2)c + l_k) \quad \forall k \in K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 11$$

$$[\lambda_{i,t}] \leq X_{i,t} \leq [\lambda_{i,t}], \quad X_{i,T} = d_i \quad \forall i \in I \quad \forall t = 1, \dots, T \quad 12$$



Caso de Estudio



Características de un motor

- 1.- 747 piezas y 330 referencias en 6 versiones del motor diesel
- 2.- N° de operaciones de Montaje: 378 (incluida la prueba rápida).
- 3.- N° de operarios, para un turno de 301 motores: 79

Experiencia computacional

- 1.- Montaje: 9 tipos de motores de 3 familias: 4x4 (p1 a p3); furgonetas (p4, p5); camiones MT (p6 a p9).
- 2.- N° de operaciones: 140. Atributos: temporales
- 3.- Demanda diaria: 270 motores (23 planes de demanda · instancias Nissan-BCN), 2 turnos (8h): $c=175$ s. $l_k=195$ s. $m=21$
- 4.- Procedimientos: (1) BDP-1, (2) GRASP-1 y (3) GRASP-2.
- 5.- Ordenador: BDP [Mac (Intel Core 2 Duo 2.33 GHz, 3 GB RAM)], GRASP [iMac (Intel Core i7 2.93 Ghz, 8 GB RAM)].
- 6.- Objetivo: (1) Minimizar la sobrecarga (2) Minimizar la no-regularidad de la producción.



GRASP-2 · Fase 1: Construcción de una secuencia

Construcción progresiva de una secuencia de productos

$$\pi(1) = (\pi_1) \rightarrow \pi(2) = (\pi_1, \pi_2) \rightarrow \pi(t) = (\pi_1, \dots, \pi_t) \rightarrow \pi(T) = (\pi_1, \dots, \pi_T)$$

1	3	5	7	9	2	4	6	8	1	9	7	5	3	8	6	4	2	1	2	3	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$$\lceil \lambda_i \cdot t \rceil \leq X_{i,t} \leq \lfloor \lambda_i \cdot t \rfloor \quad \forall i \forall t$$

Selección de productos candidatos en la t-ésima etapa

Condiciones: Productos con demanda pendiente y cumpliendo la propiedad *quota* en el ciclo t :

$$\text{Ciclo } t: X_{i,t-1} < d_i \text{ y } (\lceil \lambda_i t \rceil \leq X_{i,t-1} + 1 \leq \lfloor \lambda_i t \rfloor) \wedge (\lfloor \lambda_j t \rfloor \leq X_{j,t-1} \leq \lceil \lambda_j t \rceil, \forall j \neq i)$$

Prioridad 1: Productos con menor aportación a la sobrecarga de la secuencia

$$f_i^{(t)} \equiv W(\pi_i(t)) = W(\pi(t-1)) + \sum_{k=1}^m b_k w_{k,t}(i) \quad \forall i \in CL(t) \wedge \forall t = 1, \dots, T$$

Prioridad 2: Productos con menor aportación a la no-regularidad de la secuencia

$$g_i^{(t)} \equiv \Delta_{Q_X}(\pi_i(t)) = \Delta_{Q_X}(\pi(t-1)) + \sum_{j=1}^{|I|} (X_{j,t} - \lambda_j t)^2 \quad \forall i \in CL(t) \wedge \forall t = 1, \dots, T$$



GRASP-2 · Fase 2: Mejora mediante búsqueda local

1	3	5	7	9	2	4	6	8	1	9	7	5	3	8	6	4	2	1	2	3	4
	t'												t								t'

$$\lfloor \lambda_i \cdot t \rfloor \leq X_{i,t} \leq \lceil \lambda_i \cdot t \rceil \quad \forall i \forall t$$

Regularización de la secuencia:

Si $\pi(T)$ no cumple $\lfloor \lambda_i \cdot t \rfloor \leq X_{i,t} \leq \lceil \lambda_i \cdot t \rceil \quad \forall i \forall t$, Hacer:

1. Resolver Problema MAX-SAT ($2 \times T \times |I|$): Intercambio exhaustivo hasta obtener $\hat{\pi}(T)$
2. Test de regularización de la secuencia:
 - Si $\hat{\pi}(T)$ cumple $\lfloor \lambda_i \cdot t \rfloor \leq X_{i,t} \leq \lceil \lambda_i \cdot t \rceil \quad \forall i \forall t$, Mejorar $\hat{\pi}(T)$ · Si_No cumple, Descartar $\hat{\pi}(T)$.

Mejora de la solución por intercambios e inserciones:

Mientras haya mejora de $W(\hat{\pi}(T)) < \Delta_{Q_x}(\hat{\pi}(T)) \wedge \lfloor X_{i,t}^* \rfloor \leq X_{i,t} \leq \lceil X_{i,t}^* \rceil \quad \forall i \forall t$, Hacer:

1. Intercambio en avance de π_i en intervalo $[t+1, t'-1]$ · Intercambiar $\hat{\pi}_i \leftrightarrow \hat{\pi}_\tau \quad \forall \tau \in [t+1, t'-1]$
2. Intercambio en retroceso de π_i en intervalo $[t'+1, t-1]$ · Intercambiar $\hat{\pi}_i \leftrightarrow \hat{\pi}_\tau \quad \forall \tau \in [t'+1, t-1]$
3. Inserción en avance de π_i en intervalo $[t+1, t'-1]$ · Insertar $\hat{\pi}_i$ en toda posición $\tau \in [t+1, t'-1]$
4. Inserción en retroceso de π_i en intervalo $[t'+1, t-1]$ · Insertar $\hat{\pi}_i$ en toda posición $\tau \in [t'+1, t-1]$



Experimento. Condiciones y métricas

Datos: 21 estaciones · 42 operarios · 9 modelos · ciclo 175 s, ventana 195 s, 23 planes de 270 u.

	BDP-1	GRASP-1	GRASP-2
Código	Compilado Ref.[6]	Compilado Ref.[3]	Compilado
Ejecución	iMac (Intel Core 2 Duo 2.33 GHz, 3 GB de RAM)	iMac (Intel Core i7 2.93 GHz, 8 GB de RAM)	iMac (Intel Core i7 2.93 Ghz, 8 GB de RAM)
Ventana BDP	8 anchos : H = (1, 10, 50, 100, 250, 500, 750, 1000)	-	-
Modelos	Min W · (no quota)	Min W · Min U · quota	Min W · Min Δ · quota
Admisión / Iteraciones	-	Iter=10 (25,50,100)%	Iter=20 (25,50,100)%
Ejecuciones	184 (23x8)	69 (23x3) · 690 soluc.	69 (23x3) · 1380 soluc.
CPU / Plan	7664.27 s	425.3 s	679.5 s
quota / int. forzada	NO / SI	SI / SI	SI / SI

Métricas (Ganancias):

$$\Delta \mathcal{P} \nu \mathcal{P}'(\varepsilon) = \frac{W_{\mathcal{P}'}(\varepsilon) - W_{\mathcal{P}}(\varepsilon)}{\min(W_{\mathcal{P}'}(\varepsilon), W_{\mathcal{P}}(\varepsilon))} \left\{ \begin{array}{l} \forall \varepsilon \in E \\ \forall \mathcal{P} \in \{G2, B\} \\ \forall \mathcal{P}' \in \{B, G1\} \end{array} \right\} \quad \Delta \mathcal{P} \nu \mathcal{P}'(\varepsilon) = \frac{\Delta Q_X(\varepsilon)_{\mathcal{P}'} - \Delta Q_X(\varepsilon)_{\mathcal{P}}}{\min(\Delta Q_X(\varepsilon)_{\mathcal{P}'}, \Delta Q_X(\varepsilon)_{\mathcal{P}})} \left\{ \begin{array}{l} \forall \varepsilon \in E \\ \forall \mathcal{P} \in \{H, G2\} \\ \forall \mathcal{P}' \in \{G1, G2\} \end{array} \right\}$$



Resultados · Sobrecarga

$\varepsilon \in E$	W_{BDP1}	W_{GRASP1}	W_{GRASP2}	$\Delta G2vB$	$\Delta G2vG1$	$\Delta BvG1$	W_{BG12}	Ganador
1	166	142	152	0.09	-0.07	-0.17	142	G1
2	464	404	392	0.18	0.03	-0.15	392	G2
3	432	436	436	-0.01	0.00	0.01	432	BDP
4	440	535	515	-0.17	0.04	0.22	440	BDP
5	897	868	871	0.03	-0.00	-0.03	868	G1
6	663	748	739	-0.11	0.01	0.13	663	BDP
7	823	790	784	0.05	0.01	-0.04	784	G2
8	129	96	86	0.50	0.12	-0.34	86	G2
9	1149	1235	1234	-0.07	0.00	0.07	1149	BDP
10	1249	1246	1246	0.00	0.00	-0.00	1246	G1/G2
11	50	124	116	-1.32	0.07	1.48	50	BDP
12	369	284	280	0.32	0.01	-0.30	280	G2
13	379	399	403	-0.06	-0.01	0.05	379	BDP
14	578	543	535	0.08	0.01	-0.06	535	G2
15	553	461	452	0.22	0.02	-0.20	452	G2
16	223	255	227	-0.02	0.12	0.14	223	BDP
17	640	556	548	0.17	0.01	-0.15	548	G2
18	962	1067	1063	-0.10	0.00	0.11	962	BDP
19	980	971	969	0.01	0.00	-0.01	969	G2
20	104	234	208	-1.00	0.13	1.25	104	BDP
21	854	943	939	-0.10	0.00	0.10	854	BDP
22	1104	1084	1080	0.02	0.00	-0.02	1080	G2
23	107	107	107	0.00	0.00	0.00	107	Todos
Media	-	-	-	-0.056	0.022	0.091	-	11 (9)



Resultados · No-regularidad

$\varepsilon \in E$	$\Delta_{Q_x}(\varepsilon)_H$	$\Delta_{Q_x}(\varepsilon)_{G1}$	$\Delta_{Q_x}(\varepsilon)_{G2}$	$\Delta H_v G1$	$\Delta H_v G2$	$\Delta G2 v G1$	$\Delta_{Q_x}(\varepsilon)_{G12}$	Ganador
1	400.00	400.00	400.00	0.00	0.00	0.00	400.00	G1/G2
2	250.70	397.01	376.81	0.58	0.50	0.05	376.81	G2
3	263.70	380.60	368.15	0.44	0.40	0.03	368.15	G2
4	263.06	396.43	404.54	0.51	0.54	-0.02	396.43	G1
5	247.92	429.02	389.42	0.73	0.57	0.10	389.42	G2
6	262.78	395.67	379.71	0.51	0.44	0.04	379.71	G2
7	269.17	403.35	394.28	0.50	0.46	0.02	394.28	G2
8	248.31	414.02	384.14	0.67	0.55	0.08	384.14	G2
9	252.31	394.76	399.30	0.56	0.58	-0.01	394.76	G1
10	249.35	415.47	358.11	0.67	0.44	0.16	358.11	G2
11	247.97	429.02	419.86	0.73	0.69	0.02	419.86	G2
12	239.93	416.24	384.93	0.73	0.60	0.08	384.93	G2
13	239.82	419.79	406.54	0.75	0.70	0.03	406.54	G2
14	237.86	408.90	385.10	0.72	0.62	0.06	385.10	G2
15	259.96	401.11	380.51	0.54	0.46	0.05	380.51	G2
16	248.94	388.06	380.59	0.56	0.53	0.02	380.59	G2
17	249.91	391.60	382.74	0.57	0.53	0.02	382.74	G2
18	245.07	402.56	404.42	0.64	0.65	-0.00	402.56	G1
19	266.48	373.52	356.22	0.40	0.34	0.05	356.22	G2
20	268.80	386.50	350.91	0.44	0.31	0.10	350.91	G2
21	312.50	409.83	407.50	0.31	0.30	0.01	407.50	G2
22	249.76	382.68	383.69	0.53	0.54	-0.00	382.68	G1
23	267.96	377.08	368.56	0.41	0.38	0.02	368.56	G2
Media	-	-	-	0.54	0.48	0.04	-	19 (18)



Conclusiones

1. Propuesta de un modelo para el MMSP-W con secuencias cuota, interrupción forzada y objetivos: (1) minimizar la sobrecarga de trabajo, y (2) minimizar la no-regularidad de la producción.
2. Tres procedimientos: BDP-1, GRASP-2, GRASP-2
3. BDP-1 y GRASP-2 empatan con 11 mejores soluciones sobre 23 (en W)
4. GRASP-2 vence a BDP-1 en 12 planes, pierde en 10 y empata en 1 (en W)
5. GRASP-2 gana a GRASP-1 en 17 planes, pierde en 3 y empata en 3 (en W)
6. BDP-1 vence a GRASP-1 10 veces de 23, pierde en 12 planes y empata en 1 (en W)
7. GRASP-2 vence a GRASP-1 con el 2.2% de ganancia media (en W)
8. BDP-1 vence en promedio a GRASP-2 (5.6%) y a GRASP-1 (9.1%) (en W)
9. Tiempos CPU por plan: BDP-1 7664.3 s, GRASP-1 425.3 s y GRASP-2LP 679.5 s.
10. GRASP-2 vence a GRASP-1 en 18 planes, pierde en 4 y empata en 1 (en Δ_{QX})
11. GRASP-2 vence a GRASP-1 con el 4% de ganancia media (en Δ_{QX})
12. GRASP-2 aventaja a GRASP-1 en el 6% respecto a la cota Hamilton (en Δ_{QX})
13. GRASP-1 es **1.6** veces más rápido que GRASP-2 y **18** que BDP-1 (**11.3** G2 versus B)
14. GRASP 1 y 2 son los procedimientos más eficientes, pues **1s** de parada de línea equivale a **2.29 €**

