

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA – BARCELONATECH  
OPE – ORGANIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE EMPRESA (ASPECTOS TÉCNICOS, JURÍDICOS  
Y ECONÓMICOS EN PRODUCCIÓN )

# Sistemas Avanzados de Producción. Equilibrado de líneas de producción III

SISTEMAS AVANZADOS DE PRODUCCIÓN 240EO316 – Máster Universitario en Ingeniería de Organización  
(240MUEO) - ETSEIB

Joaquín Bautista-Valhondo

OPE-PROTHIUS – OPE-MSc.2017/34 240EO316 (20170423) - <http://futur.upc.edu/OPE> - [www.prothius.com](http://www.prothius.com) -  
Departamento de Organización de Empresas – ETSEIB · UPC



**PROTHIUS**  
Càtedra Organització Industrial

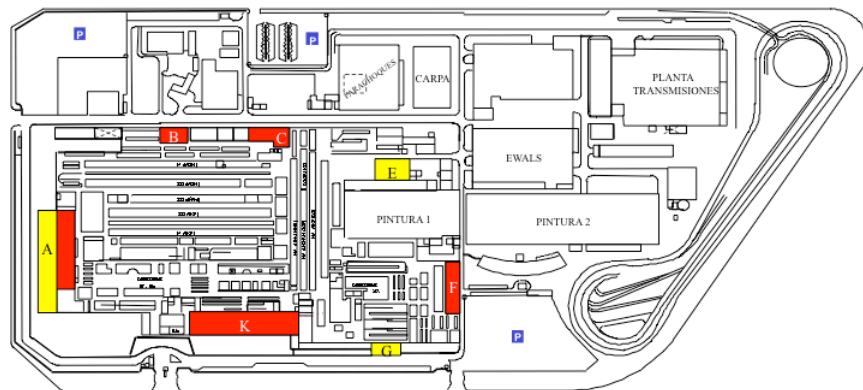
SAP' 17 – ALBP (III) 0  
J. Bautista

# Contenido

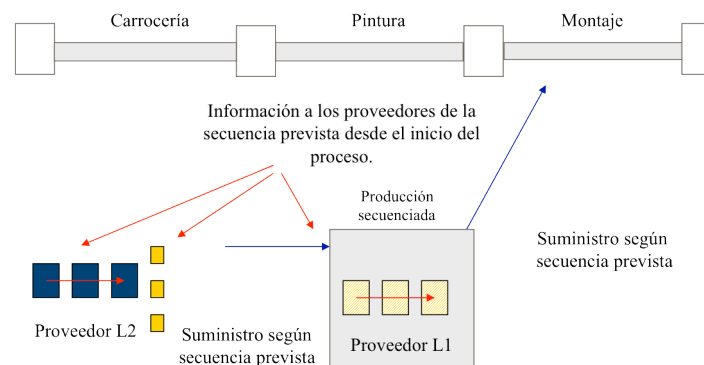
- Introducción
- Líneas de productos mixtos con múltiples atributos
- Tipología de modelos con atributos temporales y espaciales
- Modelos TSALBP. Formulación
- Modelo TSALBP-m/c/A. Programa matemático
- Riesgo ergonómico. Métodos de valoración
- Riesgo ergonómico. Unificación de métodos Caso de estudio
- Ejemplo ilustrativo
- Modelo TSALBP-R\_erg. Nomenclatura
- Modelo TSALBP-R\_erg. Formulación
- Caso de Estudio
- GRASP · Fase constructiva
- GRASP · Fragmentación y fase de mejora
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias



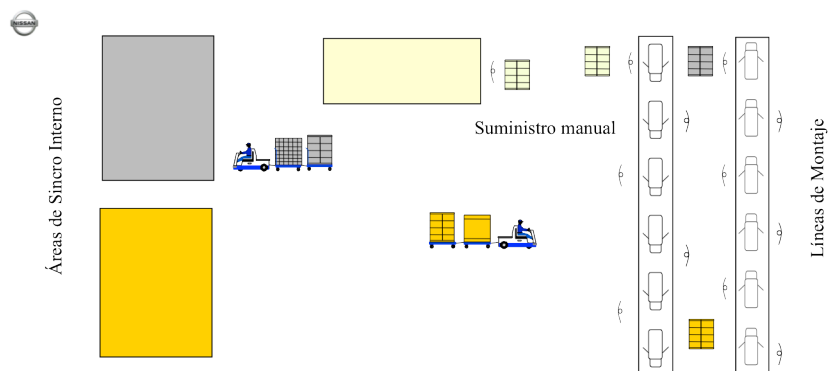
# Introducción



Planta de fabricación Nissan-BCN



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

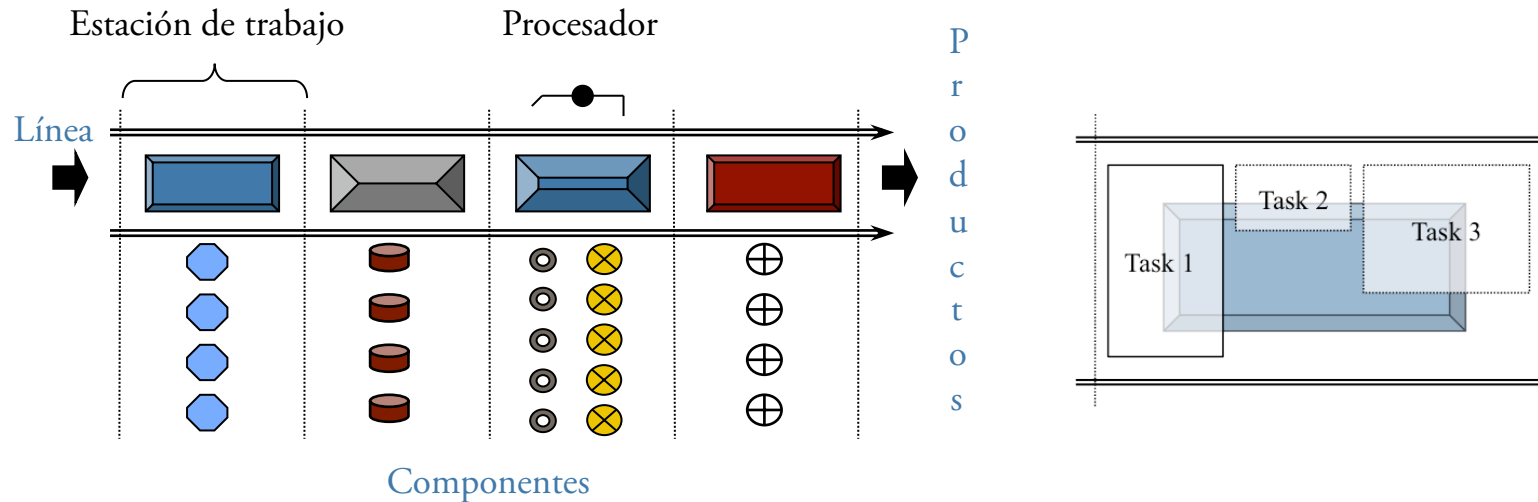


Suministro a líneas. Logística Interna



Ejemplos de líneas objeto de estudio

# Líneas de productos mixtos con múltiples atributos



## Problemas de equilibrado con atributos TEMPORALES, ESPACIALES y de CONTINGENCIA

- TSALBP · *Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problem* · Límites Ciclo · Área
- TSALBP-ergo: Límites Ciclo · Área · Riesgo ergonómico

Un equilibrado de líneas consiste en asignar un conjunto de tareas  $J$  a un conjunto de estaciones  $K$  respetando límites y restricciones con el propósito de alcanzar la máxima PRODUCTIVIDAD y SEGURIDAD del sistema.

# Tipología de modelos con atributos temporales y espaciales

Tipología TSALBP: Incorpora la optimización y/o limitación del tiempo y el espacio

NOMBRE	ESTACIONES ( $m$ )	CICLO ( $c$ )	ÁREA ( $A$ )	TIPO
SALBP-F	Fijo	Fijo	-	F
SALBP-1	Minimizar	Fijo	-	OP
SALBP-2	Fijo	Minimizar	-	OP
SALBP-E	Minimizar	Minimizar		OP
TSALBP-F	Fijo	Fijo	Fijo	F
TSALBP-m	Minimizar	Fijo	Fijo	OP
TSALBP-c	Fijo	Minimizar	Fijo	OP
TSALBP-A	Fijo	Fijo	Minimizar	OP
TSALBP-m/c	Minimizar	Minimizar	Fijo	MOP
TSALBP-m/A	Minimizar	Fijo	Minimizar	MOP
TSALBP-c/A	Fijo	Minimizar	Minimizar	MOP
TSALBP-m/c/A	Minimizar	Minimizar	Minimizar	MOP



# Modelos TSALBP. Formulación

## Parámetros

$J$	Conjunto de tareas – operaciones - ( $j = 1, \dots,  J $ ).
$K$	Conjunto de estaciones de trabajo ( $k = 1, \dots,  K $ ).
$t_j$	Tiempo de proceso de la operación $j \in J$ a actividad normal.
$a_j$	Área lineal requerida por la operación $j \in J$ .
$P_j$	Conjunto de operaciones precedentes inmediatas de la operación $j \in J$ .
$c$	Ciclo: tiempo concedido a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.
$m$	Número de estaciones de trabajo: $m =  K $ .
$A$	Área lineal concedida a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.

## Variables

$x_{j,k}$	Variable binaria que vale 1 si $j \in J$ se asigna a $k \in K$ , y vale 0 en caso contrario.
$S_k$	Carga de trabajo de la estación $k \in K$ , i.e. conjunto de operaciones constituyentes de $k \in K$ .
$c$	Ciclo: tiempo concedido a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.
$m$	Número de estaciones de trabajo: $m =  K $ .
$A$	Área lineal concedida a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.



# Modelo TSALBP-m/c/A. Programa matemático

*TSALBP-m/c/A · Multi-objetivo · Formulació:*

$$\text{PM-TSALBP-m/c/A: } \text{Min } \vec{z} = (m, c, A) \quad (0)$$

s.a.:

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (1)$$

$$c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \quad (2)$$

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} x_{j,k} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, |J| \quad (4)$$

$$m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx_{j,k} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, |J| \quad (5)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x_{j,k} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, |J| \quad (6)$$

$$A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j x_{j,k} \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, |J| \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x_{j,k} - x_{i,k}) \geq 0 \quad \forall \{i, j\} \subseteq J : i \in P_j \quad (8)$$

$$x_{j,k} \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, |J|, \forall k = 1, \dots, m_{\max} \quad (9)$$



# Riesgo ergonómico. Métodos de valoración

1. Carga Postural: RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*)
2. Movimientos Repetitivos: OCRA (*Occupational Repetitive Action*)
3. Manipulación Manual de Carga: NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*)



## Carga Postural

Actividades que requieren posturas forzadas o inadecuadas que sobrecargan la estructura osteomuscular.



## Movimientos Repetitivos

Actividades que suponen la realización de esfuerzos rápidos y repetitivos en un grupo osteomuscular, generando fatiga, sobrecarga y dolor.



## Manipulación Manual de Carga

Actividades que conllevan el levantamiento, empuje, agarre, desplazamiento, tracción o colocación de un objeto por parte de un único trabajador o varios trabajadores.





## Riesgo ergonómico. Unificación de métodos

Carga Postural (RULA), Movimientos Repetitivos (OCRA), Manipulación Manual de Carga (NIOSH)

<i>Nivel</i>	<i>Descriptor</i>	<i>Acción correctora</i>
L1	Aceptable	Sin acción. No supone dolencia o riesgo al trabajador
L2	Leve-Moderado	Analizar estación. Mejorar estación en plazo corto-medio
L3	Alto	Analizar y mejorar puesto de trabajo de inmediato. Supervisión médica. Control periódico
L4	Inaceptable	Modificación radical y de inmediato del puesto de trabajo

L1	L2	L3	L4
$1 \leq \chi_{\phi,j} < 2$	$2 \leq \chi_{\phi,j} < 3$	$3 \leq \chi_{\phi,j} < 4$	$\chi_{\phi,j} \geq 4$

$\chi_{\phi,j}$ : Categoría de la tarea  $j \in J$  respecto al factor de riesgo  $\phi \in \Phi$

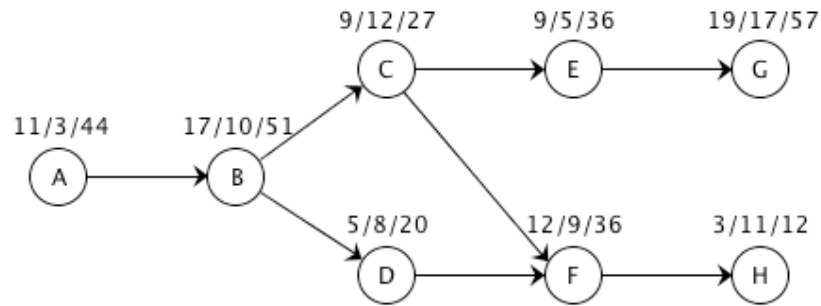
$t_j$ : Tiempo de proceso de la tarea  $j \in J$

$R_{\phi,j}$ : Riesgo ergonómico de la tarea  $j \in J$  respecto al factor de riesgo  $\phi \in \Phi$  ( $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$ )

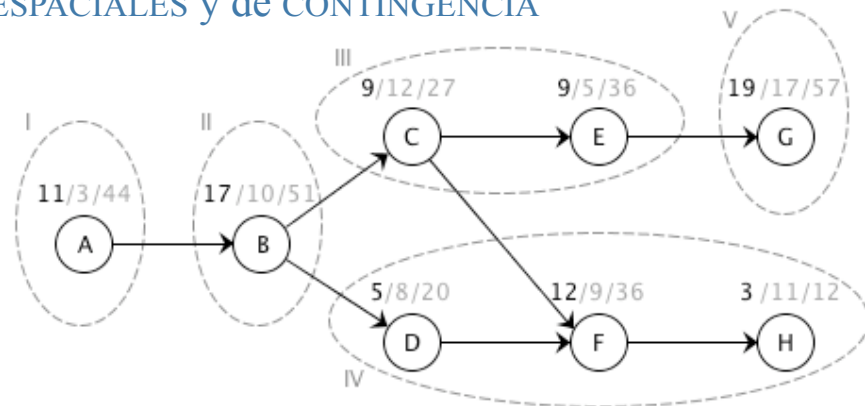


# Ejemplo ilustrativo

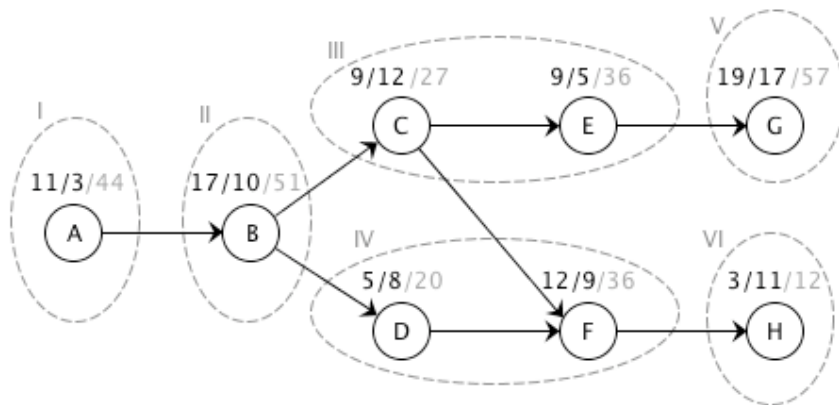
Problemas de equilibrado con atributos TEMPORALES, ESPACIALES y de CONTINGENCIA



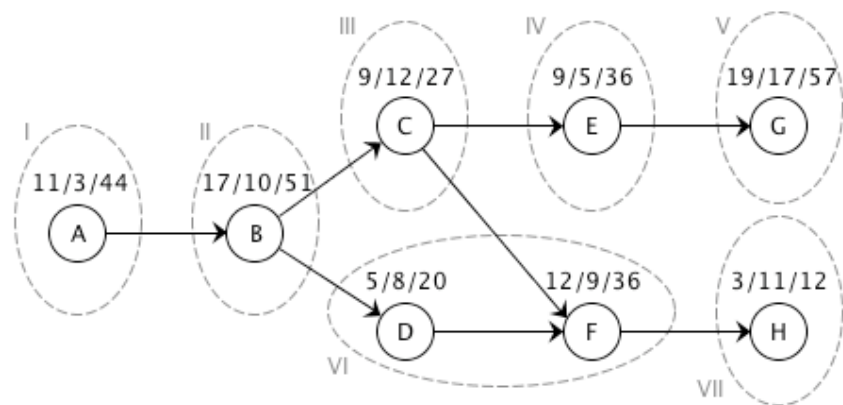
Grafo orientado de tareas. Los atributos temporales, espaciales y de riesgo se separan mediante “/”.



Solución para la versión SALBP-1 del problema con tiempo de ciclo  $c=20$ :  $m=5$ .



Solución para la versión TSALBP-1 del problema con tiempo de ciclo  $c=20$  y área disponible  $A=20$ :  $m=6$ .



Solución para la versión TSALBP-1-E del problema con  $c=20$ ,  $A=20$  y  $Rmax=60$ :  $m=7$ .



# Modelo TSALBP-R\_erg. Nomenclatura

## Parámetros

$J$	Conjunto de tareas – operaciones - ( $j = 1, \dots,  J $ ).
$K$	Conjunto de estaciones de trabajo ( $k = 1, \dots,  K $ ).
$\Phi$	Conjunto de factores de riesgo físicos y psíquicos ( $\phi = 1, \dots,  \Phi $ ).
$t_j$	Tiempo de proceso de la operación $j \in J$ a actividad normal.
$a_j$	Área lineal requerida por la operación $j \in J$ .
$\chi_{\phi,j}$	Categoría de la operación $j \in J$ respecto al factor de riesgo $\phi \in \Phi$ .
$R_{\phi,j}$	Riesgo ergonómico de la operación $j \in J$ generado por el factor de riesgo $\phi \in \Phi$ : $R_{\phi,j} = t_j \cdot \chi_{\phi,j}$
$P_j$	Conjunto de operaciones precedentes inmediatas de la operación $j \in J$ .
$c$	Ciclo: tiempo concedido a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.
$m$	Número de estaciones de trabajo: $m =  K $ .
$A$	Área lineal concedida a toda estación $k \in K$ para realizar el trabajo asignado a ellas.

## Variables

$x_{j,k}$	Variable binaria que vale 1 si $j \in J$ se asigna a $k \in K$ , y vale 0 en caso contrario.
$S_k$	Carga de trabajo de la estación $k \in K$ , i.e. conjunto de operaciones constituyentes de $k \in K$ .
$R_\phi$	Riesgo ergonómico máximo del factor de riesgo $\phi \in \Phi$ en toda $k \in K$ para completar $S_k$ .
$\bar{R}(\Phi)$	Promedio de riesgos ergonómicos máximos del conjunto de factores $\Phi$ asociados a la línea.



## Modelo TSALBP-R\_erg. Formulaci3n

$$\text{TSALBP-R\_erg :} \quad \min \bar{R}(\Phi) = \frac{1}{|\Phi|} \sum_{\phi \in \Phi} R_{\phi} \quad (1)$$

s.a:

$$\sum_{k \in K} x_{j,k} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j \cdot x_{j,k} \leq c \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} a_j \cdot x_{j,k} \leq A \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} k \cdot x_{j,k} \leq m \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$R_{\phi} - \sum_{j \in J} R_{\phi,j} \cdot x_{j,k} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall \phi \in \Phi \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} k(x_{i,k} - x_{j,k}) \leq 0 \quad \forall j \in J, \forall i \in P_j \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{j,k} \geq 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{j,k} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (9)$$



# 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, espaciales y de riesgo
- 3.- Demanda diaria: 30 motores de cada tipo (instancia #1 Nissan-BCN), 2 turnos (8h):  $c = 180$  s.
- 4.- N° de iteraciones GRASP: 10000. Factor de admisión tareas candidatas: 25%, 50% y 100%.
- 5.- Ordenador: iMac (Intel Core i7 2.93 Ghz, 8 GB de RAM, MAC OS X 10.6.8).
- 6.- Objetivo: Minimizar riesgo ergonómico en función del N° de estaciones ( $m=19$  a 25) · Área lineal limitada ( $A = 4, 5$  y 10 metros)



# GRASP · Fase constructiva (1)

*Construcción progresiva de una secuencia de operaciones*

$$\pi(1) = (\pi_1) \rightarrow \pi(2) = (\pi_1, \pi_2) \rightarrow \pi(n) = (\pi_1, \dots, \pi_n) \rightarrow \pi(N) = (\pi_1, \dots, \pi_N)$$

1	9	10	3	5	11	13	14	16	18	4	7	15	19	21	8	17	20	23	25	26	27
---	---	----	---	---	----	----	----	----	----	---	---	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----

*Selección de operaciones candidatas en la n-ésima etapa*

Condición: Operaciones pendientes de asignación con sus precedentes asignadas ( $P_j$ )

$$\forall j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)$$

Prioridad 1 : Mayor Riesgo acumulado por la operación  $j \in J$  y sus siguientes  $F_j^*$

$$f_j^{(n)} = \sum_{\varphi \in \Phi} t_j \chi_{\varphi,j} + \sum_{\varphi \in \Phi} \sum_{h \in F_j^*} t_h \chi_{\varphi,h} \quad \forall j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)$$

Prioridad 2 : Menor aportación a la irregularidad del Riesgo en  $\pi(n) = \pi(n-1) \cup \{j\}$

$$g_j^{(n)} = \sum_{\varphi \in \Phi} \left( t_j \chi_{\varphi,j} + \sum_{h=1}^{n-1} t_{\pi_h} \chi_{\varphi,\pi_h} - n \cdot r_{\varphi}(J) \right)^2 \quad \forall j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)$$

$$\text{Tasa de Riesgo: } r_{\varphi}(J) = \frac{1}{|J|} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \chi_{\varphi,j} \quad \forall \varphi \in \Phi$$



## GRASP · Fase constructiva (2)

*Esquema:*

1. Inicialización:  
 Input:  $\Lambda, J, r_\phi(J), (t_j, a_j, \chi_{\phi,j}) \forall j \in J, \forall \phi \in \Phi$   
 Hacer:  $n = 0, \pi(n) = \{\emptyset\}, N = |J|$
2. Crear conjunto de tareas candidatas:  
 $n \leftarrow n + 1$   
 Sea  $RCL(n) = \{j \in J: j \notin \pi(n-1) \wedge P_j \subseteq \pi(n-1)\}$  lista de tareas candidatas.
3. Evaluar alternativas:  
 $\forall j \in RCL(n)$  determinar:  

$$f_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} t_j \cdot \chi_{\phi,j} + \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{h \in F_j^*} t_h \cdot \chi_{\phi,h}$$

$$g_j^{(n)} = \sum_{\phi \in \Phi} \left( t_j \cdot \chi_{\phi,j} + \sum_{h=1}^{n-1} t_{\pi_h} \cdot \chi_{\phi,\pi_h} - n \cdot r_\phi(J) \right)^2$$
4. Ordenar alternativas:  
 Sea  $\overline{RCL}(n) = (j_1, \dots, j_{|RCL(n)|})$  la lista ordenada, que satisface:  

$$\left( f_j^{(n)} > f_{j'}^{(n)} \right) \vee \left[ \left( f_j^{(n)} = f_{j'}^{(n)} \right) \wedge \left( g_j^{(n)} < g_{j'}^{(n)} \right) \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow pos(j, \overline{RCL}(n)) < pos(j', \overline{RCL}(n)) \quad \forall \{j, j'\} \subseteq RCL(n)$$
5. Seleccionar alternativa:  
 Sea  $pos^* = -int(-\Lambda \cdot |\overline{RCL}(n)| \cdot RND)$  la posición seleccionada  
 Entonces:  $j^* = j_{pos^*} \in \overline{RCL}(n) = (j_1, \dots, j_{|RCL(n)|})$  es la tarea seleccionada
6. Actualizar:  $\pi(n) \equiv \pi(n-1) \cup \{j^*\}$
7. Test de Finalización  
 Si  $n < N$  ir\_a Paso 2  
 Si\_no FIN



## GRASP · Fragmentación y fase de mejora

$$t(S_k) \leq 180, a(S_k) \leq 4, 5, 10 \quad \forall k \in K$$

1	9	10	3	5	11	13	14	16	18	4	7	15	19	21	8	17	20	23	25	26	27
$k = 1$			$k = 2$				$k = 3$				$k = 4$										

### Fragmentación de la secuencia:

Procedimiento iterativo:

1. Fijar valores:  $m, c, A, [R_{\text{inf}}^{(0)}, R_{\text{sup}}^{(0)}]$
2. Iteraciones: Bisección sobre  $[R_{\text{inf}}^{(n)}, R_{\text{sup}}^{(n)}]$  hasta obtener solución:

$$(t(S_k) \leq c) \wedge (a(S_k) \leq A) \wedge (R_{\text{inf}}^{(n)} \leq R(S_k) \leq R_{\text{sup}}^{(n)}) \quad \forall k \in K$$

### Mejora de la solución:

Mientras haya mejora de  $R_{\text{sup}}^{(n)} \wedge (t(S_k) \leq c) \wedge (a(S_k) \leq A) \forall k \in K$ , Hacer:

1. Descarga de tareas desde la estación con más Riesgo hacia las colindantes.
2. Recarga de tareas desde la estación con menos Riesgo desde las colindantes.
3. Inserción de tareas de la estación con más Riesgo en las restantes, respetando precedencias.
4. Intercambio de tareas entre la estación con más Riesgo y las restantes, respetando precedencias.





# Resultados

RIESGO MÁXIMO SEGÚN NÚMERO DE ESTACIONES

MÉTODO ( $c, A$ )	19	20	21	22	23	24	25	Min
GRASP (180, 4)	-	-	495	360	315	295	<b>270</b>	<b>270</b>
MILP (180, 4)	-	-	375	330	310	280	275	275
GRASP (180, 5)	-	-	315	<b>300</b>	285	<b>270</b>	<b>260</b>	<b>260</b>
MILP (180, 5)	-	-	310	<b>300</b>	280	280	275	275
GRASP (180, 10)	<b>350</b>	330	305	295	278	<b>270</b>	<b>255</b>	<b>255</b>
MILP (180, 10)	<b>350</b>	315	300	285	275	<b>270</b>	<b>255</b>	<b>255</b>

GANANCIA GRASP VERSUS MILP SEGÚN NÚMERO DE ESTACIONES

( $c, A$ )	19	20	21	22	23	24	25	Media
(180, 4)	-	-	-0.32	-0.09	-0.02	-0.05	<b>0.02</b>	-0.09
(180, 5)	-	-	-0.02	<b>0.00</b>	-0.02	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.01</b>
(180, 10)	<b>0.00</b>	-0.05	-0.02	-0.04	-0.01	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	-0.02
	<b>0.00</b>	-0.05	-0.12	-0.04	-0.01	-0.01	<b>0.03</b>	-0.03

$m = \{19, 20, 21, 22, 23, 24, 25\} \cdot A = \{4, 5, 10\}$   
 GRASP:  $Iter_{max} = 10000 \cdot \Lambda = \{25\%, 50\%, 100\%\} \cdot 68.52 s$   
 MILP:  $Cplex (v11.0) \cdot 2h$

$$\Delta GvM = \frac{S_{MILP}(m, A) - S_{GRASP}(m, A)}{\min\{S_{MILP}(m, A), S_{GRASP}(m, A)\}}$$



## Conclusiones

1. Propuesta de un modelo MILP para ALBP con dos objetivos: (1) minimizar el Riesgo Ergonómico, y (2) respetar las limitaciones de atributos temporales y espaciales.
2. La minimización del riesgo ergonómico supone la creación de nuevos puestos de trabajo.
3. Se aplican 3 variantes de GRASP ( $\text{Iter}_{\max}$ : 10000; y  $\Lambda$ : 25%, 50% y 100%) sobre el ejemplar #1 Nissan-BCN, con  $m = 19, \dots, 25$  y  $A=4, 5$  y 10. i.e. 63 ejecuciones
4. Se emplea para MILP el solver CPLEX (v11.0) limitado a 2h de CPU por ejecución.
5. GRASP requiere 68.52 s en promedio por cada ejecución (3426 iteraciones promedio).
6. CPLEX emplea 2h en promedio por cada ejecución (partiendo de la solución anterior).
7. GRASP mejora o iguala a MILP en 7 de 17 ocasiones.
8. La ganancia global de MILP sobre GRASP es del 3%
9. La ganancia parcial de MILP sobre GRASP es del 6.2% (cuando MILP es ganador)
10. La ganancia parcial de GRASP sobre MILP es del 3.8% (cuando GRASP es ganador)
11. GRASP es 105 veces más rápido que MILP



## References

Bautista, J., Batalla-García, C., Alfaro-Pozo, R., 2016, Models for Assembly Line Balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes, Eur. J. Oper. Res. 251(3), 814-829.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.042>

Chica, M., Bautista, J., Cordon, O., Damas, S., 2016. A multiobjective model and evolutionary algorithms for robust time and space assembly line balancing under uncertain demand. Omega 58, 55-68.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.003>

Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., Batalla-García, C., 2015. GRASP Approach to a Min-Max Problem of Ergonomic Risk in Restricted Assembly Lines. In Advances in Artificial Intelligence · Lecture Notes in Computer Science 9422, pp 278-288.

[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24598-0\\_25](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24598-0_25)

Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J. 2015. Interactive Preferences in Multiobjective Ant Colony Optimization for Assembly Line Balancing. Soft Computing 19 (10), 2891-2903.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00500-014-1451-1>

Enlaces:

<http://www.prothius.com/pubs/?lang=es>

<http://www.prothius.com/pubs/?filtre=lib&lang=es>

<http://www.prothius.com/pubs/?filtre=sem&lang=es>

<http://alb.mansci.de/>



**PROTHIUS**  
Càtedra Organització Industrial