



Cátedra Nissan

-PROTHIUS-

Sistemas avanzados de producción: Nociones sobre *equilibrado de líneas de producción y montaje*

Joaquín Bautista Valhondo

D-18/2008

(Rec. Migia/ SAP-1999/2005-jbv)

Departamento de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Cataluña

Publica:

Universitat Politècnica de Catalunya
www.upc.edu



Edita:

Cátedra Nissan
www.nissanchair.com
director@nissanchair.com

Equilibrado de líneas de producción y montaje

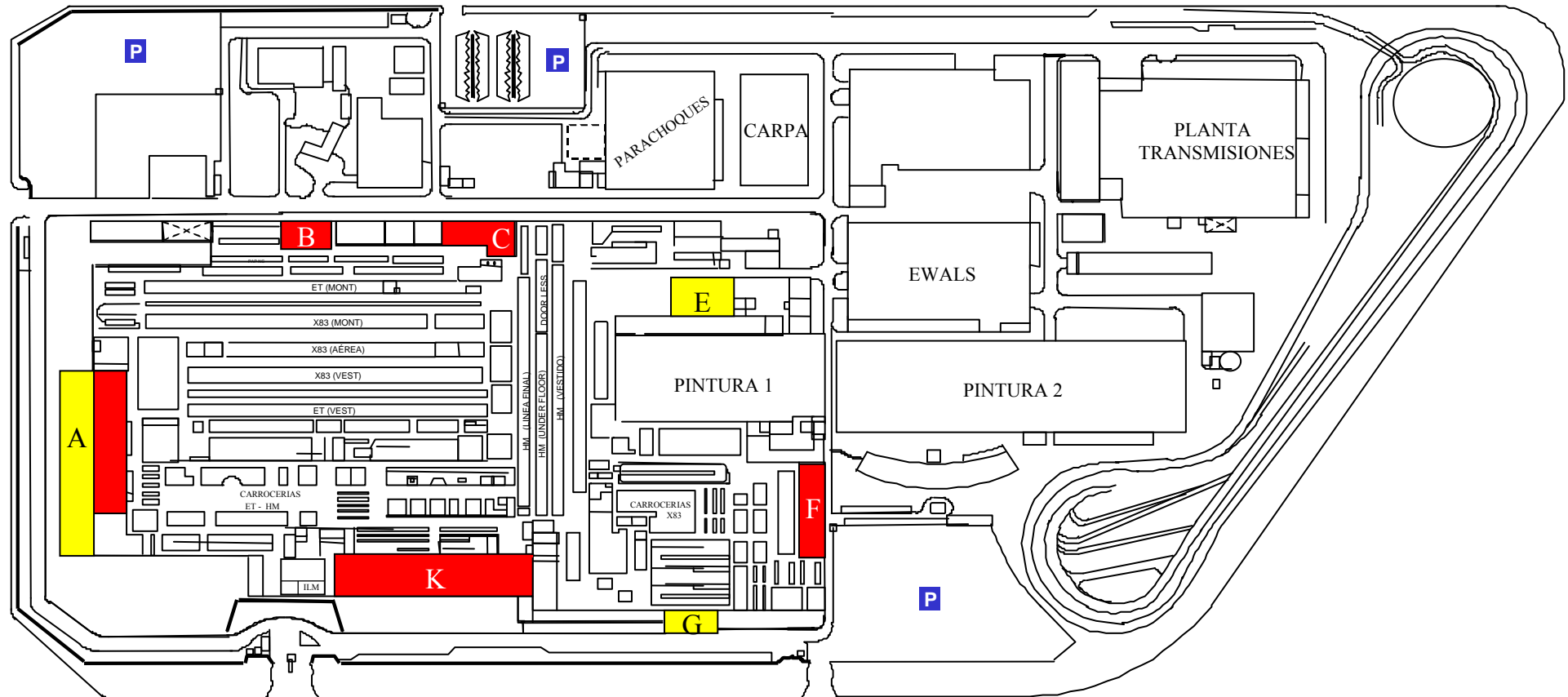


Departament
d'Organització
d'Empreses

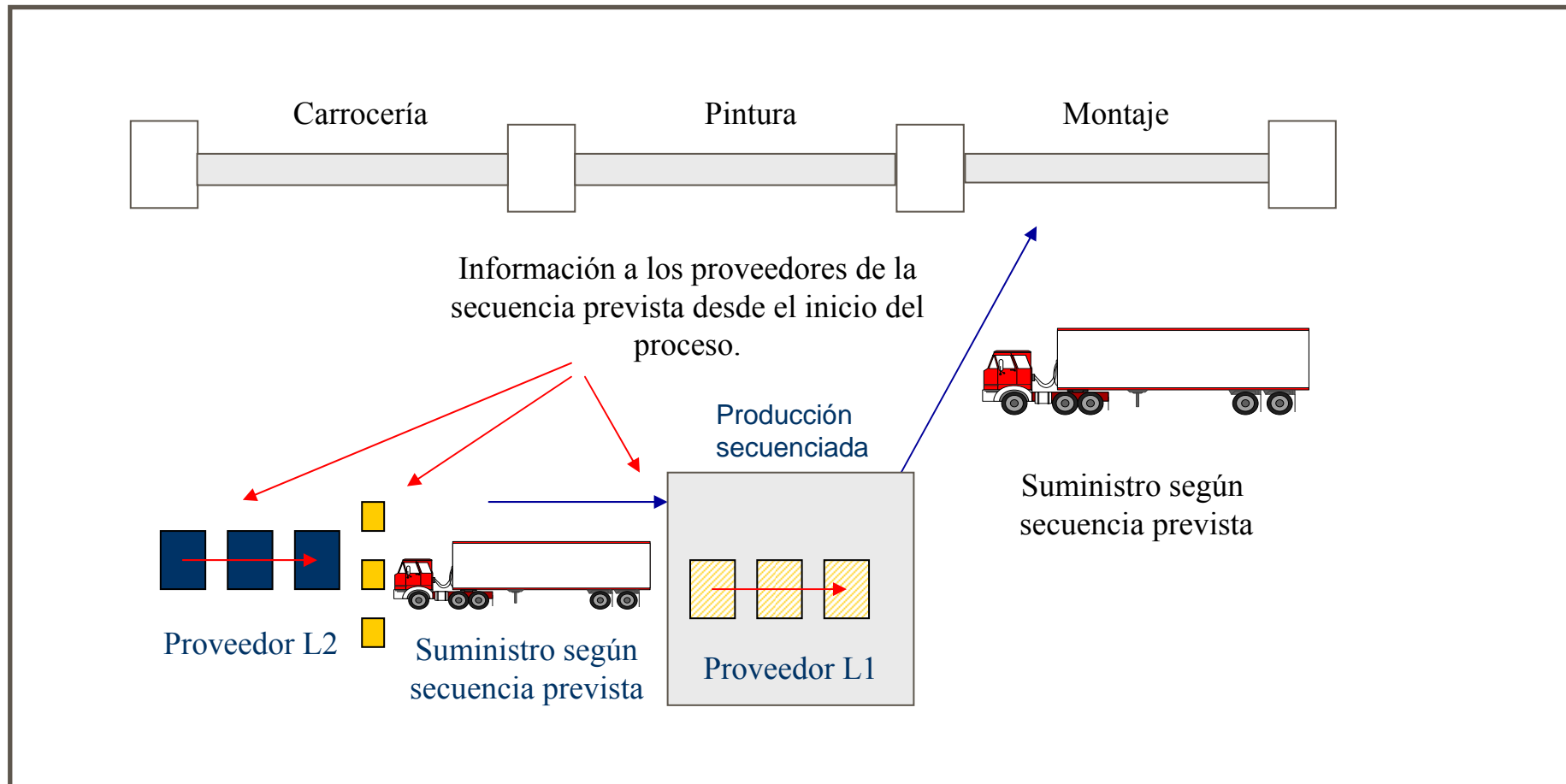
Índice

- Entorno
- Líneas de producción
- Tipología de las líneas
- Problemas de equilibrado de líneas
- Modelos básicos y cotas SALBP
- Resolución SALBP
- Restricciones adicionales
- UALBP
- TSALBP-NISSAN
- Síntesis y crítica

Entorno (1/4): Planta de fabricación



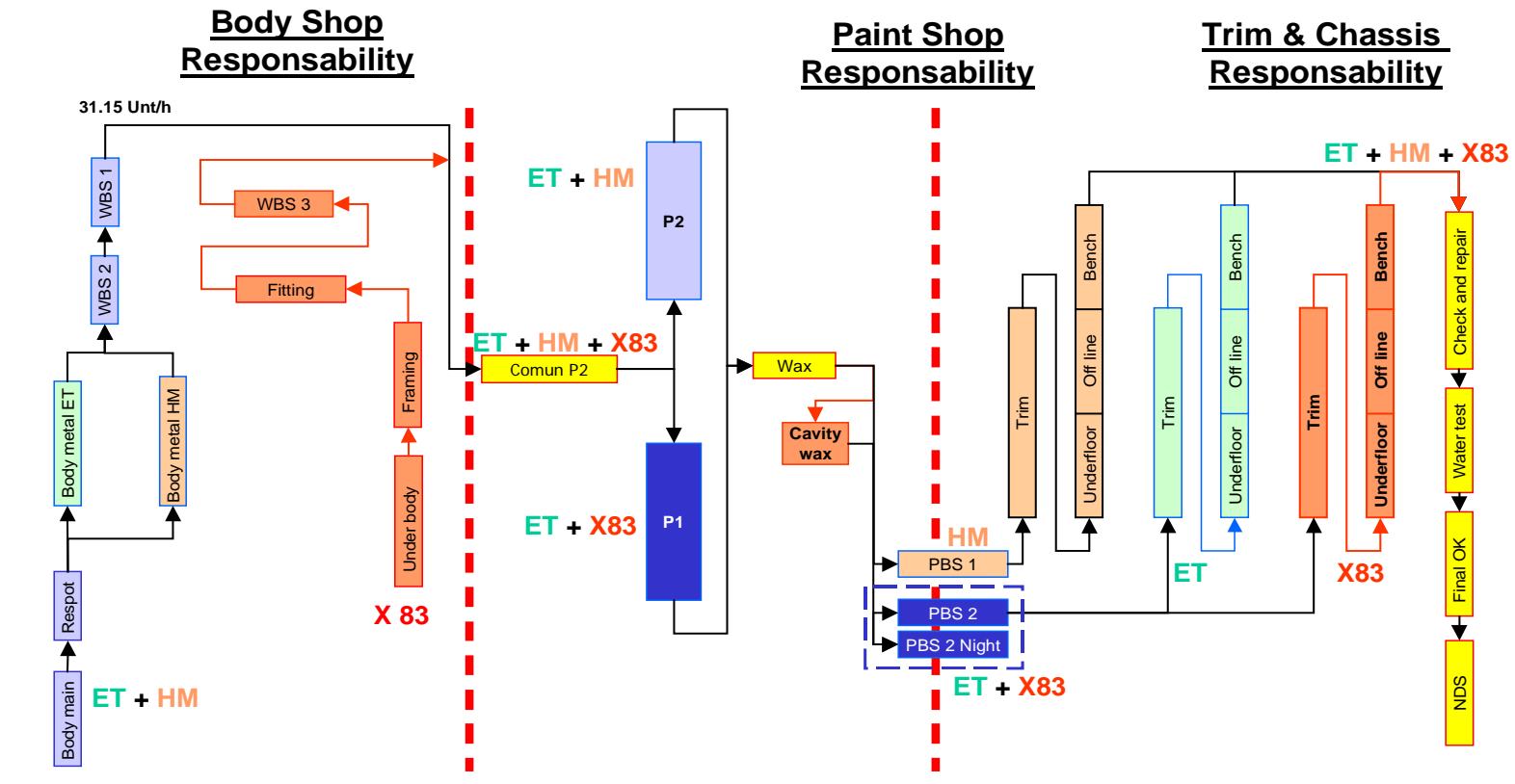
Entorno (2/4): Procesos



Entorno (3/4): Líneas



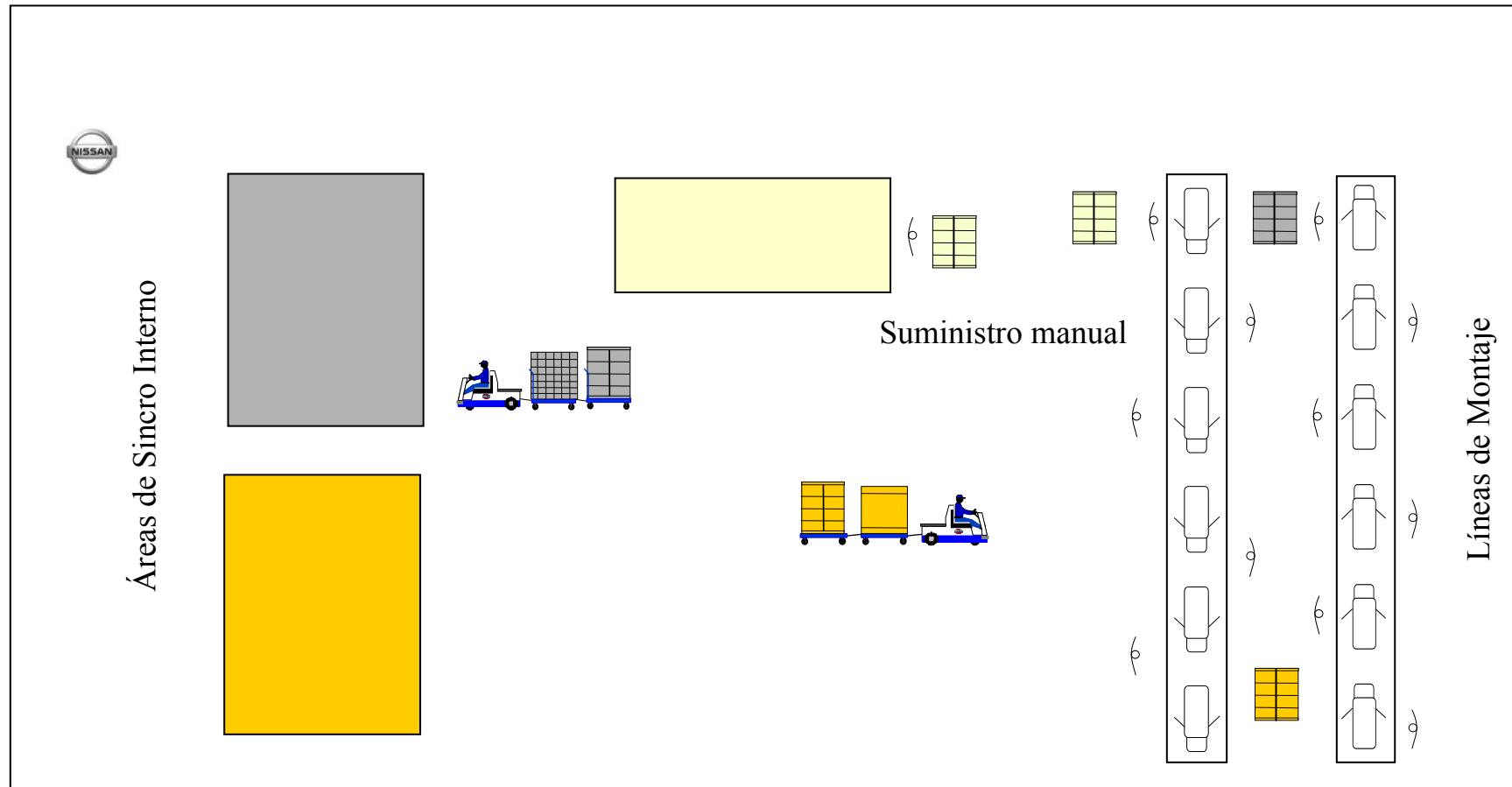
Global management of the vehicle's flow.



NISSAN MOTOR IBÉRICA, S.A. Sep.' 2002



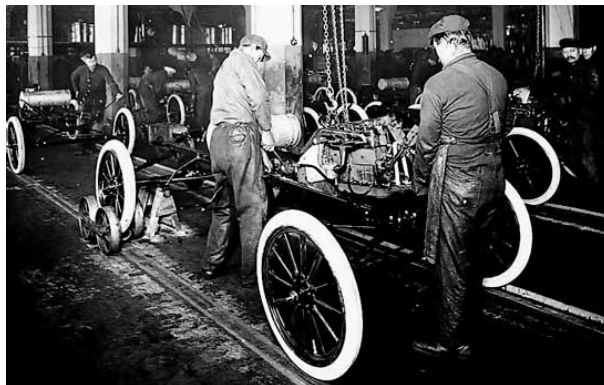
Entorno (4/4): Suministro a líneas



Líneas de producción (1/3): Algunos antecedentes



El Arsenal de Venecia: Hacia el año 1100 el Dux Faliero ordena el asentamiento del Arsenal propiciando una revolución en la organización de la construcción naval (buques de combate y galeras de mercado en masa). El Arsenal pasaría por procesos de mejora continua y reingeniería: Vecchio (1100-1300), Nuovo (1300-1400) y Novissimo (1473-1573).



Ford T (1908-1927): La mejora de los procesos de producción en línea supuso una notable reducción de costes. Mientras que las ventas de las primeras unidades (1908) estaban vinculadas a 825\$ la unidad, en 1925 el precio del modelo T, con notables mejoras respecto a sus predecesores, estaba alrededor de los 260\$.

Líneas de producción (2/3): Ejemplo línea bastidores

Características Principales:

Nº Zonas 9

- Paso de la línea 5.7 m
- Long. Total 51.3 m

Ciclo

- Actual 163.8s

Nº operarios 10

Capacidad a 2 turnos/día:

- Diaria 292 (unid/día)
- Anual 65700 (unid/año)

Actividades operarios:

21001: Troquelado del bastidor

21010: Montaje amortiguador trasero

21002: Montaje freno disco delantero izq.

21003: Montaje freno disco delantero derecha

21004 }
21005 } Montaje eje trasero

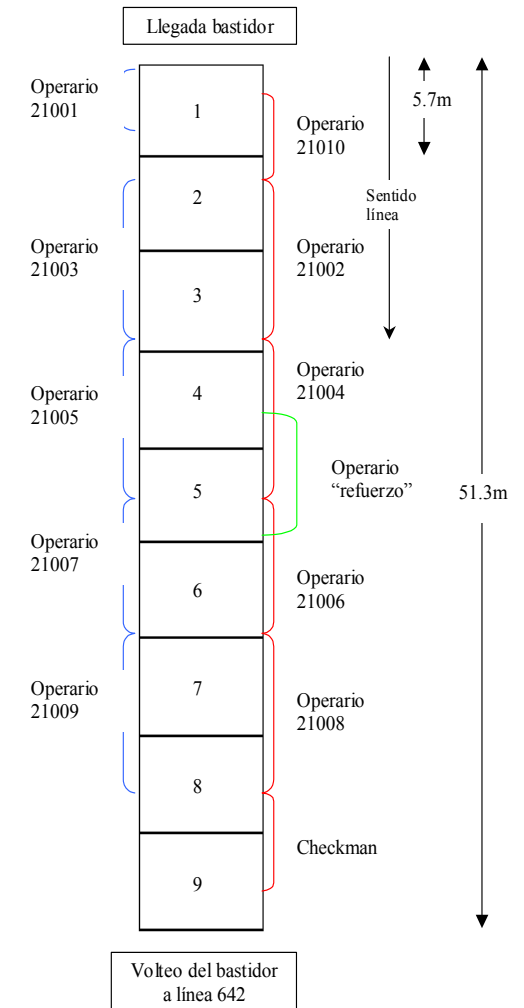
21006: Montaje barra torsión izq.

21007: Montaje barra torsión derecha.

21008: Montaje tubo de frenos izq.

21009: Montaje tubo de frenos derecha.

Checkman



Líneas de producción (3/3): Otros ejemplos



Tipología de las líneas

Una clasificación:

- Línea *monomodelo* (*single model line*), diseñada para fabricar un sólo producto o modelo.
Líneas de carrocería especializadas; montaje de vagones, etc
- Línea *multimodelo* (*multimodel line*), dos o más modelos se fabrican por lotes sucesivamente (setups).
Líneas de envasado de líquidos, detergentes..; líneas de fabricación de bastidores, contrapuertas, parachoques etc.
- Línea *modelos mixtos* (*mixed model line*), dos o más modelos se fabrican unidad a unidad.
Líneas de vestido de distintas variantes de un modelo de vehículo; ensamblado de asientos, etc.

Problemas de equilibrado de líneas (1/5)

Elementos de los problemas básicos (1/2):

- *Estación*: Parte elemental y especializada del proceso. La línea queda constituida por un número de estaciones de trabajo, m , dispuestas en serie y/o en paralelo, a través de las cuales fluye la obra en curso de un producto.
- *Tarea*: Parte elemental del trabajo. La fabricación de una unidad de producto se divide en un conjunto J con $|J|$ tareas.
- *Carga de una estación*: Subconjunto de tareas S_k ($S_k \subseteq J$) que se asigna a la estación k ($1 \leq k \leq m$). Una tarea j ($1 \leq j \leq |J|$) sólo puede estar asignada a una estación.
- *Tiempo de operación*: Cada tarea j ($1 \leq j \leq |J|$) requiere un tiempo de operación $t_j > 0$ que es función de las tecnologías de fabricación y de los recursos empleados.
- *Tareas Precedentes*: La tecnología y la propia naturaleza del producto hacen que cada tarea j pueda estar vinculada a un conjunto de tareas precedentes inmediatas, P_j , las cuales deben estar concluidas antes de que se inicie la tarea j .

Problemas de equilibrado de líneas (2/5)

Elementos de los problemas básicos (2/2):

- *Tiempo de carga de estación*: Suma de las duraciones de las tareas asignadas a la estación: $t(S_k)$, $k=1, \dots, m$.
- *Tiempo de carga total*: Suma de tiempos de carga de estación: $t_{\text{sum}} = \sum_k t(S_k)$. Trabajo total para completar una unidad de producto.
- *Tiempo de ciclo*: Tiempo concedido a cada estación para realizar las tareas de una unidad de producto que tiene asignadas: c , $\max_k \{t(S_k)\} \leq c \leq t_{\text{sum}}$.
- *Tasa de producción de la línea*: Número de unidades de producto que completa la línea en la unidad de tiempo: r ; $r=1/c$.
- *Tiempo muerto de estación*: Diferencia entre ciclo y tiempo de carga: $I_k = c - t(S_k)$, $k=1, \dots, m$.
- *Tiempo muerto de la línea*: Suma de tiempos muertos de estación que se vincula a la ineficiencia de la línea: $I_{\text{sum}} = \sum_k I_k = m \cdot c - t_{\text{sum}}$.

Problemas de equilibrado de líneas (3/5)

Descripción del problema:

- Los problemas de equilibrado de líneas de montaje ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) están enfocados a agrupar de manera eficiente y coherente las tareas del conjunto V en estaciones de trabajo.

Una clasificación:

- **SALBP** (*Simple Assembly Line Balancing Problem*): dados un conjunto de n tareas con sus atributos y un grafo de precedencias, cada tarea debe asignarse a una sola estación de manera que se satisfagan todas las restricciones de precedencia y que ningún tiempo de carga de estación, $t(S_k)$, sea mayor que el tiempo de ciclo c .
- **GALBP** (*General Assembly Line Balancing Problem*): se añaden a SALBP restricciones adicionales como: la consideración de estaciones en paralelo, las agrupaciones forzadas de tareas y las posibles incompatibilidades entre tareas, la limitación de espacio en las estaciones de trabajo, entre otras.

Problemas de equilibrado de líneas (4/5)

Variantes de SALBP:

- **SALBP-1**: minimizar el número de estaciones m dado un valor fijo del tiempo de ciclo c .
- **SALBP-2**: minimizar el tiempo de ciclo c (maximizar la tasa de producción r) dado un número fijo de estaciones m .
- **SALBP-E**: minimizar simultáneamente c y m considerando su relación con el tiempo muerto total o la ineficiencia de la línea.
- **SALBP-F**: dados m y c determinar si el problema es *factible*, y en caso afirmativo hallar una solución.

En general se pretende *maximizar la eficiencia de la línea*.

Problemas de equilibrado de líneas (5/5)

Eficiencia de la línea:

- Número mínimo de estaciones para un ciclo c :

$$m_{\min}(c) = \left\lceil \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \right\rceil \quad (\text{i})$$

- Eficiencia para m estaciones y ciclo c :

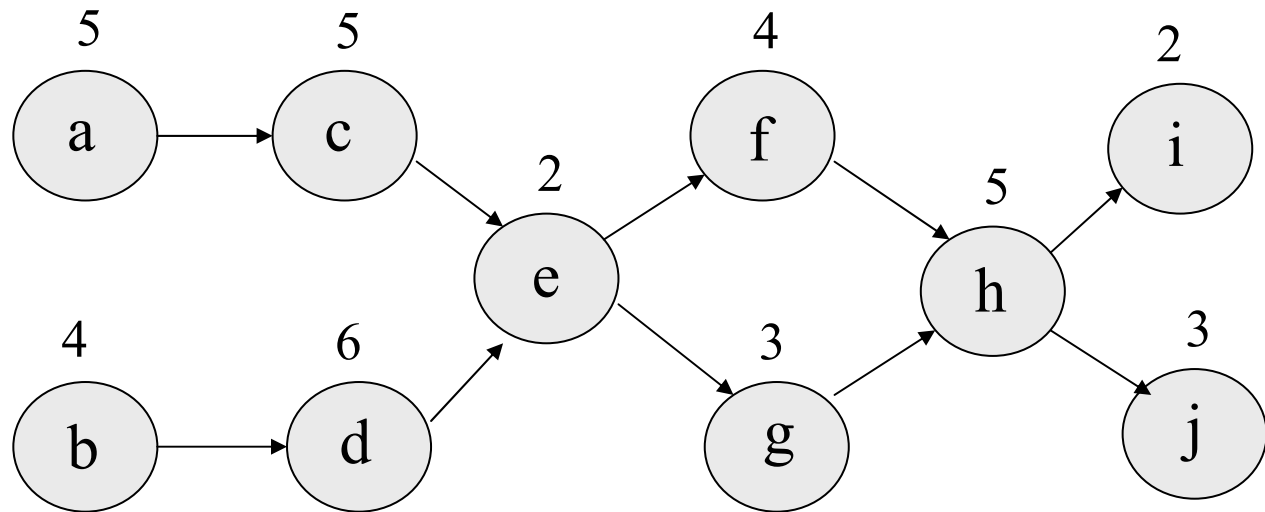
$$\eta(m, c) = \frac{1}{mc} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \quad (\text{ii})$$

- Eficiencia máxima para un ciclo c :

$$\eta_{\max}(c) = \eta(m_{\min}(c), c) \quad (\text{iii})$$

Ejemplo numérico - 01

(j) Tarea	t_j	P_j precedentes
(1) a	5	-
(2) b	4	-
(3) c	5	a
(4) d	6	b
(5) e	2	c, d
(6) f	4	e
(7) g	3	e
(8) h	5	f, g
(9) i	2	h
(10) j	3	h



Determinar los límites del tiempo de ciclo c ; el número mínimo de estaciones m_{\min} y la eficiencia máxima de la línea para los ciclos 10, 12 y 20 *ut*.

Ejercicio-1



DOE

www.nissanchair.com

SAP -170

Modelos básicos SALBP (1/6)

Hipótesis generales:

- Una unidad de producto se puede descomponer en un conjunto de tareas elementales.
- Cada tarea tiene asociado un tiempo de proceso determinista.
- Las estaciones están dispuestas en serie.
- A todas las estaciones se les concede el mismo tiempo para efectuar las tareas que tienen asignadas (estaciones cerradas).
- Las estaciones requieren recursos tecnológicos y humanos homogéneos con costes similares.

Objetivos:

- Maximizar la eficiencia de la línea: maximizar la tasa de producción: minimizar el requerimiento de recursos.

Modelos básicos SALBP (2/6)

Parámetros:

- J Conjunto de tareas ($j=1,\dots, |J|$)
- t_j Tiempo de proceso de la tarea j ($j=1,\dots, |J|$).
- P_j, P_j^* Conjuntos de precedentes de j ($j=1,\dots, |J|$) inmediatas y transitivas.
- c_{\min}, c_{\max} Tiempos de ciclo mínimo y máximo; inversos de las tasas de producción condicionadas por los requerimientos al sistema productivo.
- m_{\min}, m_{\max} Número mínimo y máximo de estaciones de trabajo; asociados a las limitaciones de los recursos tecnológicos y humanos.

Variables:

- c Tiempo de ciclo de la línea y concedido a cada estación.
- m Número de estaciones de trabajo que requiere la línea.
- $x(j,k)$ Variable binaria que adopta el valor 1 si la tarea j ($j=1,\dots, |J|$) se asigna a la estación k ($k=1,\dots, m_{\max}$), y valor 0 en caso contrario.

Modelos básicos SALBP (3/6)

$$\text{SALBP-1: } \quad \text{Min } z_1 = m \quad (0)$$

s.a :

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

$$m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx(j, k) \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \leq c_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(i, k)) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (4)$$

$$x(j, k) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (5)$$

Modelos básicos SALBP (4/6)

$$\text{SALBP-2: } \quad \text{Min } z_2 = c \quad (0)$$

s.a :

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

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(i, k)) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (3)$$

$$x(j, k) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (4)$$

Modelos básicos SALBP (5/6)

$$\text{SALBP-E: } \quad \text{Min } z_E = mc \quad (0)$$

s.a :

$$m \geq m_{\min} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} x(j, k) = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2)$$

$$m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx(j, k) \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (3)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(i, k)) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (5)$$

$$x(j, k) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (6)$$

Modelos básicos SALBP (6/6)

SALBP-F: *Satisfacer* SALBP – F : (1) – (4)

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

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \leq c_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(i, k)) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (3)$$

$$x(j, k) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (4)$$

Ejercicio-2



DOE

www.nissanchair.com

SAP -240

Cotas inferiores (1/2)

Definiciones previas (dados J y c):

$$t_{\max} = \max_{1 \leq j \leq |J|} (t_j) \quad (\text{i})$$

$$t_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^{|J|} t_j \quad (\text{ii})$$

$$p_j = \frac{t_j}{c} \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (\text{iii})$$

$$J'(a, b) = \{j \in J' \subseteq J : a < p_j < b\} \quad (\text{iv})$$

$$J'(a, b] = \{j \in J' \subseteq J : a < p_j \leq b\} \quad (\text{v})$$

$$J'[a, b] = \{j \in J' \subseteq J : a \leq p_j \leq b\} \quad (\text{vi})$$

con $0 \leq a \leq b \leq 1$

Cotas inferiores (2/2)

Salpb-1/2 (cotas inferiores globales) :

$$LB_1^{(1)}(c) = \left\lceil \frac{t_{sum}}{c} \right\rceil = \left\lceil \sum_{j=1}^{|J|} p_j \right\rceil \qquad LB_1^{(2)}(m) = \max \left(t_{max}, \left\lceil \frac{t_{sum}}{m} \right\rceil \right)$$

$$LB_2^{(1)}(c) = \left\lceil J \left(\frac{1}{2}, 1 \right) \right\rceil + \left\lceil \frac{1}{2} \left\lceil J \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right] \right\rceil \right\rceil$$

$$LB_3^{(1)}(c) = \left\lceil J \left(\frac{2}{3}, 1 \right) \right\rceil + \frac{2}{3} \left\lceil J \left[\frac{2}{3}, \frac{2}{3} \right] \right\rceil + \frac{1}{2} \left\lceil J \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3} \right) \right\rceil + \frac{1}{3} \left\lceil J \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right] \right\rceil$$

En general ($q > 3; 2p - q > 0; p, q \in \mathbb{Z}$):

$$LB_{(q-1)/q}^{(1)}(c) = \left\lceil J \left(\frac{q-1}{q}, 1 \right) \right\rceil + \frac{q-1}{q} \left\lceil J \left[\frac{q-1}{q}, \frac{q-1}{q} \right] \right\rceil + \frac{1}{q-1} \left\lceil J \left(\frac{1}{q}, \frac{q-1}{q} \right) \right\rceil + \frac{1}{q} \left\lceil J \left[\frac{1}{q}, \frac{1}{q} \right] \right\rceil$$

$$LB_{p/q}^{(1)}(c) = \left\lceil J \left(\frac{p}{q}, 1 \right) \right\rceil + \frac{p}{q} \left\lceil J \left[\frac{p}{q}, \frac{p}{q} \right] \right\rceil + \left\lceil \frac{p}{q-p} \right\rceil^{-1} \left\lceil J \left(\frac{q-p}{q}, \frac{p}{q} \right) \right\rceil + \frac{q-p}{q} \left\lceil J \left[\frac{q-p}{q}, \frac{q-p}{q} \right] \right\rceil$$

Ejercicio-3



DOE

www.nissanchair.com

SAP -270

Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Heurísticas (1/2)

Heurística básica 1: HB_1 (1/2):

Paso – 0: Inicialización

$$I_{sum} = 0; k = 1; S_k = \emptyset; T = c \text{ (} T : \text{ tiempo disponible);}$$

$$\bar{J} = J \text{ (} \bar{J} : \text{ conjunto de tareas no asignadas).}$$

Paso – 1: Construcción del conjunto de tareas candidatas a asignar ($\hat{J} \subseteq \bar{J}$)

$$\text{sea: } \hat{J} = \{j \in \bar{J} : (t_j \leq T) \wedge (P_j^* \cap \bar{J} = \emptyset)\}$$

Paso – 2: Test de cierre y apertura de estación

si $|\hat{J}| = 0$ (cierre), hacer :

$$I_{sum} \leftarrow I_{sum} + T; T = c; k \leftarrow k + 1; S_k = \emptyset; \text{Ir a Paso – 1.}$$

si _no, continuar.

Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Heurísticas (2/2)

Heurística básica 1: HB_1 (2/2):

Paso – 3: Elección de la tarea asignar (dada una regla $\rho \in P$)

$$j_{\rho}^* = \begin{cases} j', \text{ si } \exists j' \in \hat{J} : (t_{j'} = T) \\ \arg \max_{j \in \hat{J}} (v_{\rho}(j)), \text{ si_no} \end{cases}$$

*Paso – 4: Asignación de j_{ρ}^**

$$\text{hacer : } T \leftarrow T - t_{j_{\rho}^*}; S_k \leftarrow S_k \cup \{j_{\rho}^*\}; \bar{J} \leftarrow \bar{J} - \{j_{\rho}^*\}$$

Paso – 5: Test de finalización (todas las tareas asignadas)

$$\text{si } |\bar{J}| = 0, \text{ hacer :}$$

$m = k$; mostrar resultados : S_k ($k = 1, \dots, m$); finalizar.

si_no, Ir a Paso – 1.

Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Reglas (1/2)

Definiciones previas (dada una tarea j):

$$\text{Siguietes inmediatas} \quad : \quad F_j = \{j' \in J : j \in P_{j'}\} \quad (j = 1, \dots, |J|)$$

$$\text{Siguietes transitivas} \quad : \quad F_j^* = \{j' \in J : j \in P_{j'}^*\} \quad (j = 1, \dots, |J|)$$

$$\text{Primera estación asignable:} \quad e_j = \left\lceil \frac{1}{c} \left(t_j + \sum_{j' \in P_j^*} t_{j'} \right) \right\rceil \quad (j = 1, \dots, |J|)$$

$$\text{Última estación asignable} \quad : \quad l_j = m + 1 - \left\lceil \frac{1}{c} \left(t_j + \sum_{j' \in F_j^*} t_{j'} \right) \right\rceil \quad (j = 1, \dots, |J|)$$

$$\text{Nivel} \quad : \quad n_j = \max_{j' \in P_j} (n_{j'}) + 1 \quad (j = 1, \dots, |J|)$$

Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Reglas (2/2)

Dados $\hat{J} \subseteq \bar{J}$ (tareas candidatas \subseteq tareas no asignadas), P (conjunto de reglas) y α_ρ (pesos) $\forall \rho \in P$:

Seleccionar $j_\rho^* : j_\rho^* = \arg \max_{j \in \hat{J}} (v_\rho(j)) : \forall \rho \in P$

$$0. v_0(j) = Rnd(0-1) \qquad 5. v_5(j) = \frac{t_j + \sum_{j' \in F_j^*} t_{j'}}{1 + |F_j^*|} \qquad 10. v_{10}(j) = m - (l_j - e_j)$$

$$1. v_1(j) = t_j \qquad 6. v_6(j) = m - l_j \qquad 11. v_{11}(j) = \frac{|F_j^*|}{l_j - e_j}$$

$$2. v_2(j) = |F_j| \qquad 7. v_7(j) = \frac{m - l_j}{1 + |F_j^*|} \qquad 12. v_{12}(j) = t_j + |F_j^*|$$

$$3. v_3(j) = |F_j^*| \qquad 8. v_8(j) = \frac{t_j}{l_j} \qquad 13. v_{13}(j) = \max_{j' \in \hat{J}} (n_{j'}) - n_j$$

$$4. v_4(j) = t_j + \sum_{j' \in F_j^*} t_{j'} \qquad 9. v_9(j) = m - e_j \qquad 14. v_{14}(j) = \sum_{\rho \in P} \alpha_\rho \frac{v_\rho(j)}{\max_{j' \in \hat{J}} (v_\rho(j'))}$$

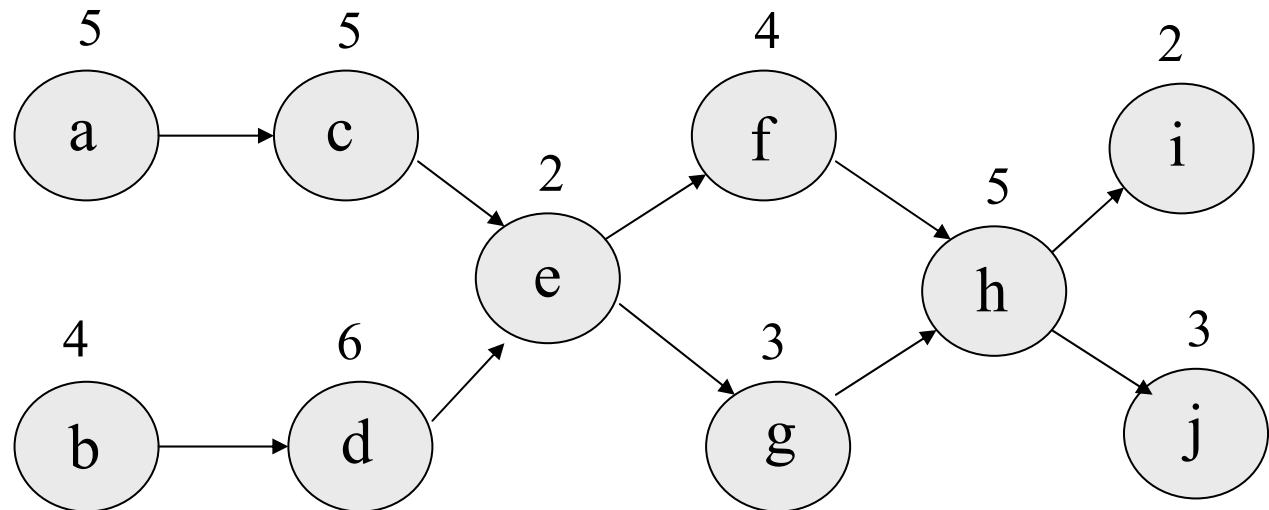
Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Ejemplo-01 (1/5)

Dados $\hat{J} \subseteq \bar{J}$ y una regla $\rho \in P$:

Seleccionar $j_\rho^* : j_\rho^* = \arg \max_{j \in \hat{J}} (v_\rho(j))$. Sea $\rho = 4$.

4. $v_4(j) = t_j + \sum_{j' \in F_j^*} t_{j'}$ $\forall j \in J$; regla (carga transitiva pendiente - Helgeson & Birnie)

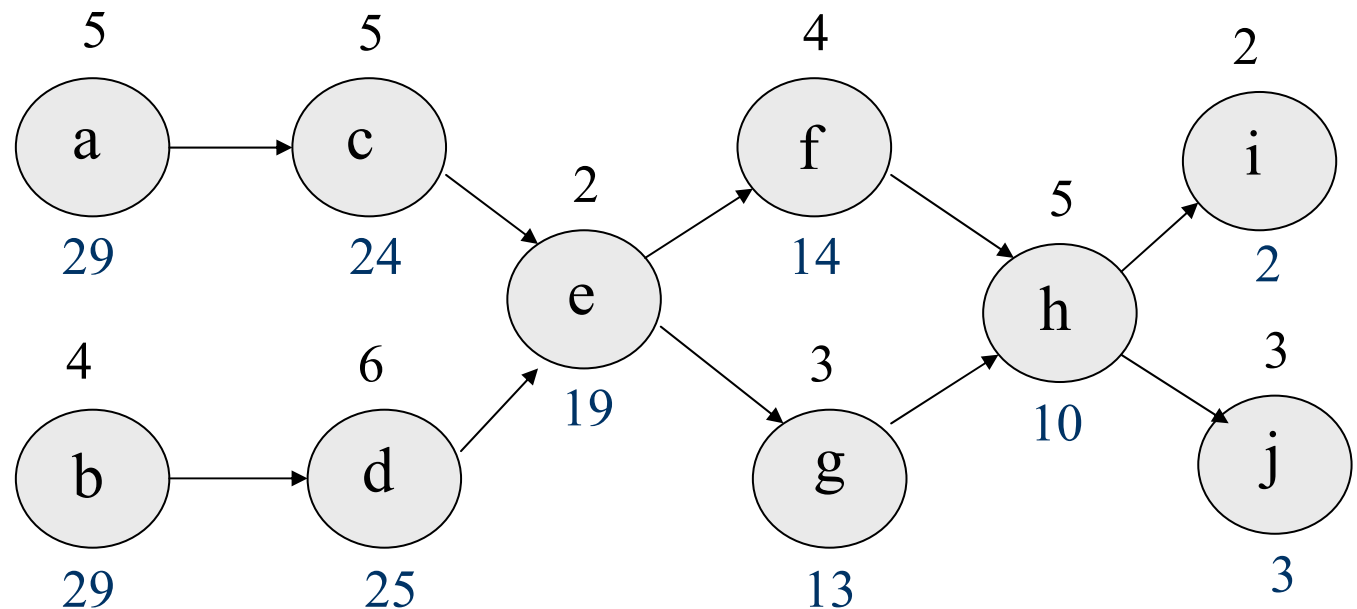
(j) Tarea	t_j	P_j precedentes
(1) a	5	-
(2) b	4	-
(3) c	5	a
(4) d	6	b
(5) e	2	c, d
(6) f	4	e
(7) g	3	e
(8) h	5	f, g
(9) i	2	h
(10) j	3	h



Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Ejemplo-01 (2/5)

Cargas transitivas pendientes ($\rho=4$) en sentido directo del grafo:

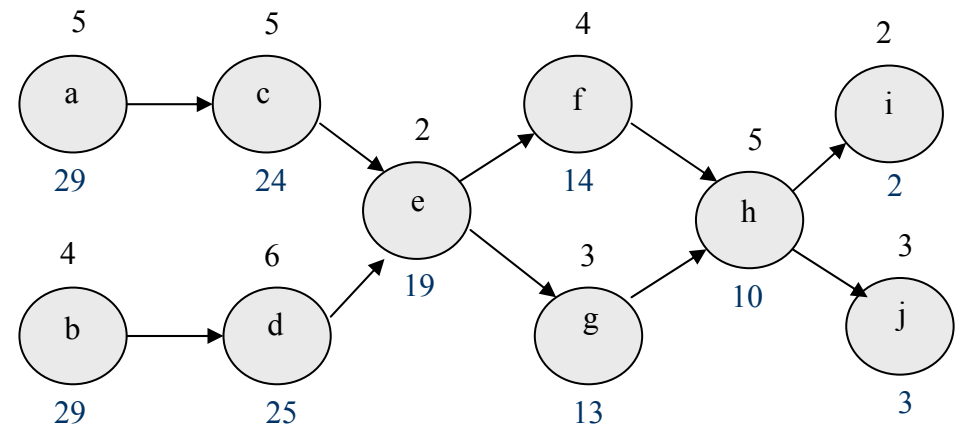
(j)	t_j	P_j preced.	$v_4(j)$ +
(1) a	5	-	29
(2) b	4	-	29
(3) c	5	a	24
(4) d	6	b	25
(5) e	2	c, d	19
(6) f	4	e	14
(7) g	3	e	13
(8) h	5	f, g	10
(9) i	2	h	2
(10) j	3	h	3



Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Ejemplo-01 (3/5)

Aplicación Heurística básica HB_1 (grafo directo, $\rho=4$, $c=10$):

k	T	\hat{J}	j_4^*	v_4^*	t_{j^*}	I_{sum}
1	10 5 0	a, b b, c -	a c	29 sat	5 5	0
2	10 6 0	b d -	b d	- -	4 6	0
3	10 8 4 1	e f, g g -	e f g	- 14 -	2 4 3	1
4	10 5 2 0	h i, j i *	h j i	- 3 -	5 3 2	1



$$c = 10 \Rightarrow m = 4$$

$$m_{\min}(c) = \left\lceil \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \right\rceil; m_{\min}(10) = \left\lceil \frac{39}{10} \right\rceil = 4$$

$$\eta_{\max}(c) = \frac{1}{m_{\min} c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j; \eta_{\max}(10) = \frac{39}{40} = 0.975$$

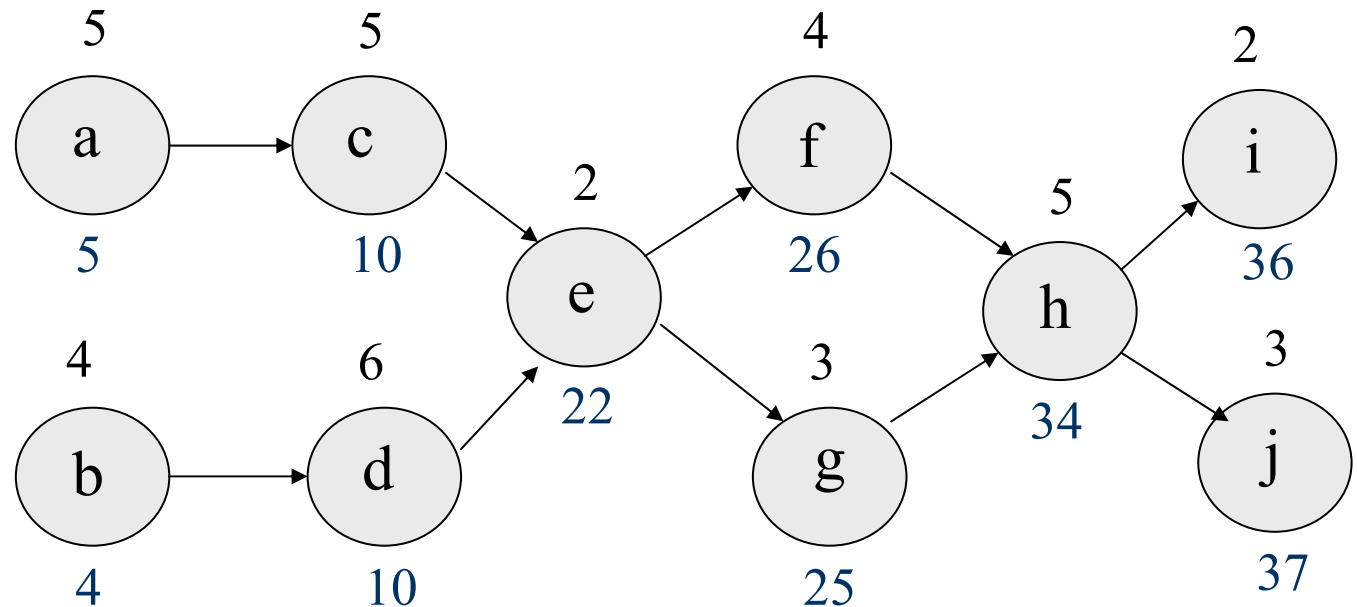
$$\eta(m, c) = \frac{1}{mc} \sum_{j=1}^{|J|} t_j; \eta(4, 10) = \frac{39}{40} = 0.975$$

Ejercicio-4 (Ejemplo-01: $\rho=1, c=13$)

Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Ejemplo-01 (4/5)

Cargas transitivas pendientes ($\rho=4$) en sentido inverso del grafo:

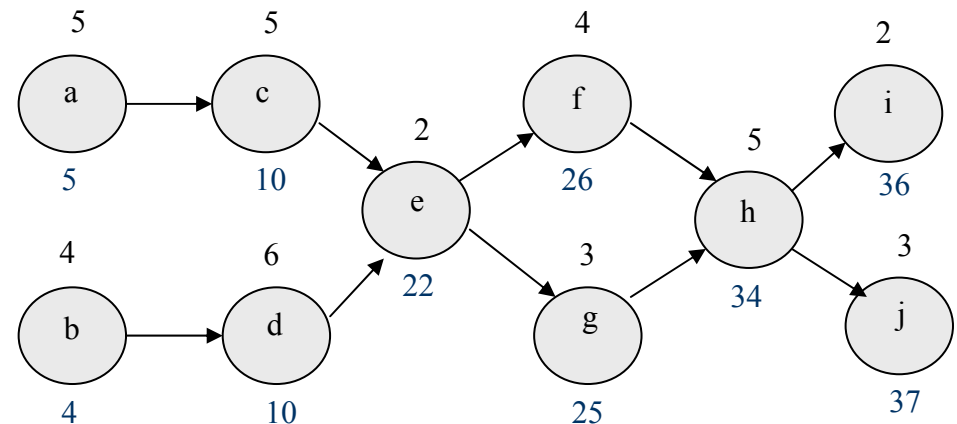
(j)	t_j	F_j	$v_4(j)$
Tarea		sig.	-
(1) a	5	c	5
(2) b	4	d	4
(3) c	5	e	10
(4) d	6	e	10
(5) e	2	f, g	22
(6) f	4	h	26
(7) g	3	h	25
(8) h	5	i, j	34
(9) i	2	-	36
(10) j	3	-	37



Resolución SALBP-1. Orientación tareas. Ejemplo-01 (5/5)

Aplicación Heurística básica HB_1 (grafo inverso, $\rho=4$, $c=10$):

k	T	\hat{J}	j_4^*	v_4^*	t_{j^*}	I_{sum}
1	10	i, j	j	37	3	0
	7	i	i	-	2	
	5	h	h	-	5	
	0	-	-	-	-	
2	10	f, g	f	26	4	1
	6	g	g	-	3	
	3	e	e	-	2	
	1	-	-	-	-	
3	10	c, d	c	10	5	1
	5	a	a	-	5	
	0	-	-	-	-	
4	10	d	d	-	6	1
	4	b	b	-	4	
	0	*	-	-	-	



$$c = 10 \Rightarrow m = 4$$

$$m_{\min}(c) = \left\lceil \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \right\rceil; m_{\min}(10) = \left\lceil \frac{39}{10} \right\rceil = 4$$

$$\eta_{\max}(c) = \frac{1}{m_{\min} c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j; \eta_{\max}(10) = \frac{39}{40} = 0.975$$

$$\eta(m, c) = \frac{1}{mc} \sum_{j=1}^{|J|} t_j; \eta(4, 10) = \frac{39}{40} = 0.975$$

Ejercicio-5 (Ejemplo-01: $\rho=1, c=15$)

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Heurísticas (1/2)

Heurística básica 2: HB_2 (1/2):

Paso – 0: Inicialización

$I_{sum} = 0; k = 0; S_{k'} = \emptyset, \forall k' = 1, \dots, m_{max}; \mathfrak{S} = \emptyset$ (\mathfrak{S} : conjunto de estaciones);
 $\bar{J} = J$ (\bar{J} : conjunto de tareas no asignadas).

Paso – 1: Construcción del conjunto de estaciones candidatas a asignar ($\hat{\mathfrak{S}} \subseteq 2^{\bar{J}}$)

sea: $\hat{\mathfrak{S}} = \{S \in 2^{\bar{J}} : (t(S) \leq c) \wedge (P_j^* \cap (\bar{J} - S) = \emptyset, \forall j \in S)\}$

Paso – 2: Elección de la estación a asignar (dada una regla $\psi \in \Psi$)

$$S_{\psi}^* = \begin{cases} S', \text{ si } \exists S' \in \hat{\mathfrak{S}} : (t(S') > c - \min_{j' \in (\bar{J} - S')} (t_{j'})) \\ \arg \max_{S \in \hat{\mathfrak{S}}} (w_{\psi}(S)), \text{ si } _ \text{no} \end{cases}$$

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Heurísticas (2/2)

Heurística básica 2: HB_2 (2/2):

*Paso – 4: Asignación de S_{ψ}^**

hacer:

$$k \leftarrow k + 1; S_k = S_{\psi}^*;$$

$$\mathfrak{S} \leftarrow \mathfrak{S} \cup \{S_k\}; \bar{J} \leftarrow \bar{J} - S_k$$

Paso – 5: Test de finalización (todas las tareas asignadas)

si $|\bar{J}| = 0$, hacer:

$$m = k; \text{mostrar resultados: } \mathfrak{S} = \{S_k (k = 1, \dots, m)\};$$

finalizar.

si _no, Ir a Paso – 1.

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Definiciones

Definiciones previas: conjuntos de precedentes y siguientes a una estación S.

	<i>Inmediatas</i>	<i>Transitivas</i>
1. Precedentes globales	$P(S) = \bigcup_{j \in S} P_j$	$P^*(S) = \bigcup_{j \in S} P_j^*$
2. Precedentes endógenas	$\dot{P}(S) = P(S) \cap S$	$\dot{P}^*(S) = P^*(S) \cap S$
3. Precedentes exógenas	$\ddot{P}(S) = P(S) - \dot{P}(S)$	$\ddot{P}^*(S) = P^*(S) - \dot{P}^*(S)$
4. Siguietes globales	$F(S) = \bigcup_{j \in S} F_j$	$F^*(S) = \bigcup_{j \in S} F_j^*$
5. Siguietes endógenas	$\dot{F}(S) = F(S) \cap S$	$\dot{F}^*(S) = F^*(S) \cap S$
6. Siguietes exógenas	$\ddot{F}(S) = F(S) - \dot{F}(S)$	$\ddot{F}^*(S) = F^*(S) - \dot{F}^*(S)$

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Generación (1/2)

Elementos :

\bar{J} : conjunto de tareas pendientes de asignación

$\hat{J}(S)$: conjunto de tareas candidatas a la expansión de S

$\hat{\mathfrak{S}}$: conjunto de estaciones candidatas a la selección

$\bar{\mathfrak{S}}$: conjunto de estaciones candidatas no_exploradas

Paso - 0 : Inicialización (dado \bar{J}):

crear ($\hat{\mathfrak{S}} = \{\{j\} \in 2^{\bar{J}} : P_j^* \cap \bar{J} = \emptyset\}$); *fijar* ($\bar{\mathfrak{S}} \leftarrow \hat{\mathfrak{S}}; iter_{\max}$); *iter* = 1

Paso - 1 : Test de finalización

si ($\bar{\mathfrak{S}} = \emptyset$) \vee ($\exists S \in \hat{\mathfrak{S}} : t(S) \geq c - \min_{j \in (\bar{J}-S)} (t_j)$) \vee (*iter* \geq *iter*_{max}), *Ir a Paso - 3*

si _no, continuar.

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Generación (2/2)

Paso – 2: Expansión de $\hat{\mathcal{S}}$ mediante conjuntos $\hat{J}(S)$

$\forall S \in \bar{\mathcal{S}},$ hacer:

$$\hat{J}(S) = \{j \in (\bar{J} - S) : (t(S) + t_j \leq c) \wedge (P_j^* \cap (\bar{J} - S) = \emptyset)\}$$

$\forall j \in \hat{J}(S),$ hacer:

$$S' = S \cup \{j\}; \hat{\mathcal{S}} \leftarrow \hat{\mathcal{S}} \cup \{S'\}; \bar{\mathcal{S}} \leftarrow \bar{\mathcal{S}} \cup \{S'\}$$

si $t(S') > c - \min_{j' \in (\bar{J} - S')} (t_{j'}),$ Ir a Paso – 1

fin \forall

$$\bar{\mathcal{S}} \leftarrow \bar{\mathcal{S}} - \{S\}$$

fin \forall

iter \leftarrow *iter* + 1; Ir a Paso – 1

Paso – 3: Finalización

$$\text{mostrar resultados: } \hat{\mathcal{S}} = \{S \in 2^{\bar{J}} : (t(S) \leq c) \wedge (\dot{P}(S) \cap (\bar{J} - S) = \emptyset)\}$$

Resolución SALBP-1. Orientación estaciones. Selección - Reglas

Dados $\hat{\mathfrak{S}} \subseteq 2^{\bar{J}}$ ($\hat{\mathfrak{S}}$: estaciones candidatas), Ψ (conjunto de reglas) y β_ψ (pesos) $\forall \psi \in \Psi$:

Seleccionar S_ψ^* : $S_\psi^* = \arg \max_{S \in \hat{\mathfrak{S}}} (w_\psi(S))$, $\forall \psi \in \Psi$.

$$0. w_0(S) = Rnd(0-1) \qquad 5. w_5(S) = \frac{t(F^*(S))}{1 + |\ddot{F}^*(S)|} \qquad 10. w_{10}(S) = m|S| - \sum_{j \in S} (l_j - e_j)$$

$$1. w_1(S) = t(S) = \sum_{j \in S} t_j \qquad 6. w_6(S) = m|S| - \sum_{j \in S} l_j \qquad 11. w_{11}(S) = \frac{|S| |\ddot{F}^*(S)|}{\sum_{j \in S} (l_j - e_j)}$$

$$2. w_2(S) = |\ddot{F}(S)| \qquad 7. w_7(S) = \frac{m|S| - \sum_{j \in S} l_j}{|S| + |S| |\ddot{F}^*(S)|} \qquad 12. w_{12}(S) = t(S) + |\ddot{F}^*(S)|$$

$$3. w_3(j) = |\ddot{F}^*(S)| \qquad 8. w_8(S) = \frac{t(S)|S|}{\sum_{j \in S} l_j} \qquad 13. w_{13}(S) = \max_{j \in J} (n_j) |S| - \sum_{j \in S} n_j$$

$$4. w_4(j) = t(F^*(S)) \qquad 9. w_9(S) = m|S| - \sum_{j \in S} e_j \qquad 14. w_{14}(S) = \sum_{\psi \in \Psi} \beta_\psi \frac{w_\psi(S)}{\max_{S' \in \hat{\mathfrak{S}}} (w_\psi(S'))}$$

Ejercicio-6 (Ejemplo-01: $\psi=1, c=11$)



DOE

www.nissanchair.com

SAP -450

Resolución SALBP-2 (asistente SALBP-1). Heurísticas (1/4)

Heurística básica 3: HB_3 (1/2). Bisección asistida por HB_1:

Paso – 0: Inicialización

fijar $\left(m_{\max} : 1 < m_{\max} < |J|, \vec{\rho} \in P^{|J|}, \mu = 0.5 \right)$;

$$c_1 = \max \left(t_{\max}, \left\lceil \frac{t_{\text{sum}}}{m_{\max}} \right\rceil \right);$$

$(m_1, S_k (k = 1, \dots, m_1)) \leftarrow \text{HB}_1(c_1, \vec{\rho});$

$$c_2 = t_{\text{sum}}; m_2 = 1$$

Paso – 1: Test inicial

si $m_1 \leq m_{\max}$, *hacer*:

$c = c_1; m = m_1; \mathfrak{S} = \{S_k (k = 1, \dots, m)\};$ *Ir a Paso – 3 (finalizar).*

si _no, continuar.

Resolución SALBP-2 (asistente SALBP-1). Heurísticas (2/4)

Heurística básica 3: HB_3 (2/2). Bisección asistida por HB_1:

Paso – 2 : Reducción del rango del ciclo

mientras $(c_2 - c_1) \geq 1$, hacer :

$$c' = c_1 + \mu(c_2 - c_1);$$

$$(m', S_k (k = 1, \dots, m')) \leftarrow \text{HB}_1(c', \vec{\rho})$$

si $m' > m_{\max}$, hacer :

$$c_1 = c'$$

si _no, hacer :

$$c_2 = c'; c = \lfloor c_2 \rfloor; m = m'; \mathfrak{S} = \{S_k (k = 1, \dots, m)\}$$

fin _mientras

Paso – 3 : Finalización

mostrar resultados : $c, m, \{S_k (k = 1, \dots, m)\}$; finalizar.

Ejercicio-7 (Ejemplo-01: $m=3$, bisección)



DOE

www.nissanchair.com

SAP -480

Resolución SALBP-2 (asistente SALBP-1). Heurísticas (3/4)

Heurística básica 4: HB_4 (1/2). Segmentación áurea asistida por HB_1:

Paso – 0: Inicialización

$$\text{fijar } \left(m_{\max} (1 < m_{\max} < |J|), \vec{\rho} \in \mathbf{P}^{|J|}, \phi = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{5}) \right); c_1 = \max \left(t_{\max}, \left\lceil \frac{t_{\text{sum}}}{m_{\max}} \right\rceil \right);$$
$$(m_1, \mathfrak{S}_1 = \{S_k (k = 1, \dots, m_1)\}) \leftarrow \text{HB_1}(c_1, \vec{\rho}); c_2 = t_{\text{sum}}; m_2 = 1; \mathfrak{S}_2 = \{J\}$$

Paso – 1: Test inicial

si $m_1 \leq m_{\max}$, hacer :

$$c = c_1; m = m_1; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_1; \text{Ir a Paso – 4 (finalizar).}$$

si _no, hacer :

$$c = c_2; m = m_2; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_2; \text{continuar.}$$

Paso – 2: Segmentación inicial

$$c'_1 = c_2 - (\phi - 1)(c_2 - c_1); c'_2 = c_1 + (\phi - 1)(c_2 - c_1);$$
$$(m'_1, \mathfrak{S}_1) \leftarrow \text{HB_1}(c'_1, \vec{\rho}); (m'_2, \mathfrak{S}_2) \leftarrow \text{HB_1}(c'_2, \vec{\rho})$$

Resolución SALBP-2 (asistente SALBP-1). Heurísticas (4/4)

Heurística básica 4: HB_4 (2/2). Segmentación áurea asistida por HB_1:

Paso – 3: Reducción del rango del ciclo

mientras $(c_2 - c_1) \geq 1$, hacer :

si $m'_1 > m_{\max}$, hacer :

$$c_1 = c'_1; c'_1 = c'_2; c'_2 = c_1 + (\phi - 1)(c_2 - c_1);$$

$$m'_1 = m'_2; \mathfrak{S}_1 = \mathfrak{S}_2; (m'_2, \mathfrak{S}_2) \leftarrow \text{HB}_1(c'_2, \vec{\rho})$$

si _no, hacer :

$$c_2 = c'_1; c'_2 = c_1 + (\phi - 1)(c_2 - c_1); c'_1 = c_2 - (\phi - 1)(c_2 - c_1);$$

$$c = \lfloor c_2 \rfloor; m = m'_1; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_1;$$

$$(m'_1, \mathfrak{S}_1) \leftarrow \text{HB}_1(c'_1, \vec{\rho}); (m'_2, \mathfrak{S}_2) \leftarrow \text{HB}_1(c'_2, \vec{\rho})$$

fin _mientras

Paso – 4: Finalización :

mostrar resultados : c, m, \mathfrak{S} ; finalizar.

Ejercicio-8 (Ejemplo-01: $m=3$, segmentación áurea)

Resolución SALBP-E (asistente SALBP-2). Heurísticas (1/4)

Heurística básica 5: HB_5 (1/2). Barrido sobre m asistido por HB_3 (SALBP-2):

Paso – 0: Inicialización

$$\begin{aligned} & \text{fijar } \left(m_{\min}, m_{\max} \left(1 < m_{\min} \leq m_{\max} < |J| \right), \vec{\rho} \in P^{|J|} \right); \\ & \left(c_{\min}, \mathfrak{S}_{\max} = \{S_k (k = 1, \dots, m_{\max})\} \right) \leftarrow \text{HB}_3(m_{\max}, \vec{\rho}); \\ & \left(c_{\max}, \mathfrak{S}_{\min} = \{S'_k (k = 1, \dots, m_{\min})\} \right) \leftarrow \text{HB}_3(m_{\min}, \vec{\rho}) \end{aligned}$$

Paso – 1: Test inicial de mínimo

si $c_{\min} m_{\max} \leq c_{\max} m_{\min}$, hacer:

$$z = c_{\min} m_{\max}; c = c_{\min}; m = m_{\max}; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_{\max}$$

si _no, hacer:

$$z = c_{\max} m_{\min}; c = c_{\max}; m = m_{\min}; \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_{\min}$$

fin _si

Resolución SALBP-E (asistente SALBP-2). Heurísticas (2/4)

Heurística básica 5: HB_5 (2/2). Barrido sobre m asistido por HB_4 (SALBP-2):

Paso – 2 : Barrido sobre el número de estaciones

$$m' = m_{\min} + 1$$

mientras $m' < m_{\max}$, hacer :

$$(c', S_k (k = 1, \dots, m')) \leftarrow \text{HB_3}(m', \vec{\rho})$$

si $m'c' \leq z$, hacer :

$$z = m'c'; c = c'; m = m'; \mathfrak{S} = \{S_k (k = 1, \dots, m')\}$$

fin _ si

$$m' \leftarrow m' + 1$$

fin _ mientras

Paso – 3 : Finalización

mostrar resultados : z, c, m, \mathfrak{S} ; finalizar.

Ejercicio-9 (Ejemplo-01: $2 \leq m \leq 5$, Barrido)



DOE

www.nissanchair.com

SAP -540

Algunas restricciones adicionales

- Incompatibilidad entre tareas*

Sea \aleph el conjunto de pares de tareas incompatibles (sin transitividad):

$$\aleph = \left\{ (j, j') \in J^2 : (j \in S_k) \wedge (j' \in S'_k) \Rightarrow k \neq k', \forall k, k' = 1, \dots, m_{\max} \right\}$$

add:

$$\left| \sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(j', k)) \right| \geq 1 \quad (\forall (j, j') \in \aleph) \quad (7)$$

- Selectividad entre tareas (ILU-NISSAN) de una misma familia*

Sea Λ_j la familia de tareas alternativas a la representante (estándar) j :

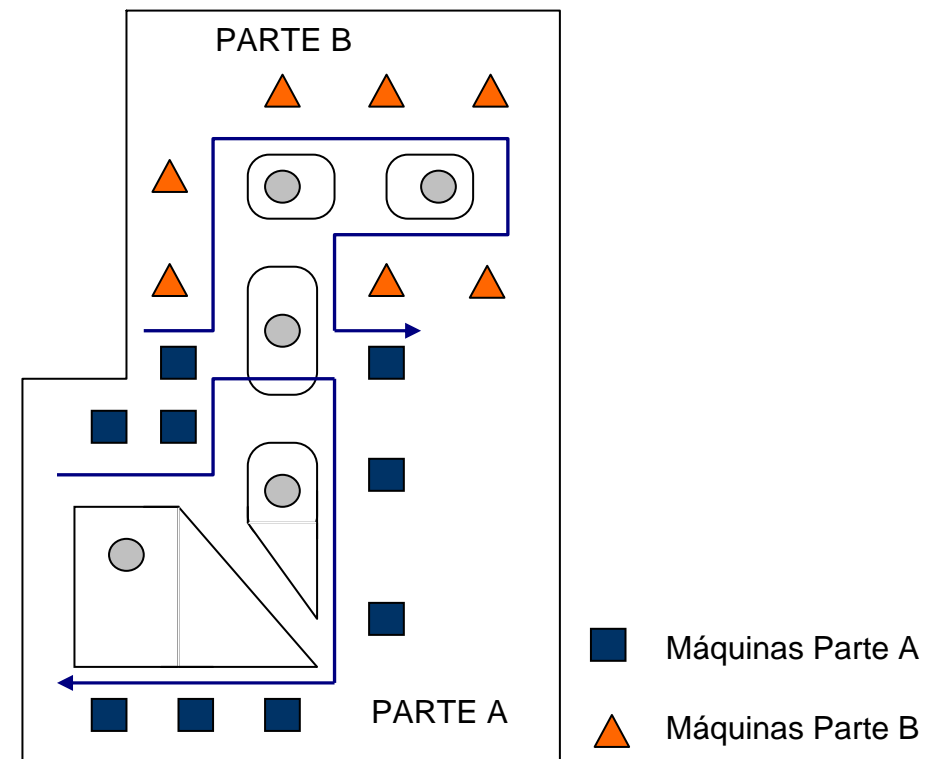
$\forall j \in J : |\Lambda_j| > 1$, hacer:

rectificar:
$$t_j x(j, k) \leftarrow \sum_{\lambda_j \in \Lambda_j} t_{\lambda_j} x(\lambda_j, k) \quad (k = 1, \dots, m_{\max})$$

add:
$$\sum_{\lambda_j \in \Lambda_j} x(\lambda_j, k) = x(j, k) \quad (k = 1, \dots, m_{\max})$$

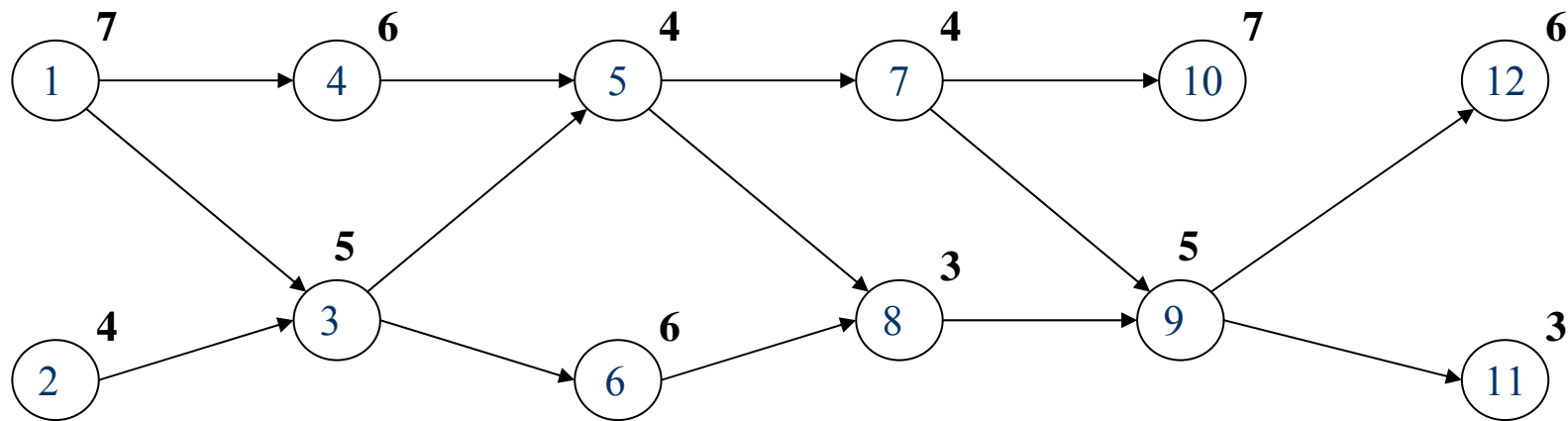
Líneas en U

Algunas características: (1) cercanía entre los puntos de entrada y de salida del WIP de la línea, (2) posibilidad de establecer estaciones abiertas, (3) posibilidad de concentrar los requerimientos de espacio y de reducir movimientos, (4) comodidad ergonómica ante cambios del ciclo.



Líneas en U: Ejemplo-02

- *Presentación:*



$c = 10$:

$$t_{sum} = 60, m_{\min}(10) = \left\lceil \frac{60}{10} \right\rceil = 6, \eta_{\max}(10) = \frac{60}{6 \times 10} = 1.00, \eta(6,10) = \frac{60}{6 \times 10} = 1.00$$

Determinar los límites del tiempo de ciclo c ; el número mínimo de estaciones m_{\min} y la eficiencia máxima de la línea para los ciclos 10, 12 y 20 *ut*.

Ejercicio-10 (Ejemplo-02: $c=12$, $c=20$)

Modelos básicos UALBP (1/4)

$$\text{UALBP-1: } \text{Min } z'_1 = m \quad (0)$$

s.a :

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

$$m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx(j, k) \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \leq c_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} y(j) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j^*) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} (1 - y(j)) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in F_j^*) \quad (5)$$

$$x(j, k), y(j) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (6)$$

Modelos básicos UALBP (2/4)

$$\text{UALBP-2: } \quad \text{Min } z'_2 = c \quad (0)$$

s.a :

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

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} y(j) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j^*) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} (1 - y(j)) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in F_j^*) \quad (4)$$

$$x(j, k), y(j) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (5)$$

Modelos básicos UALBP (3/4)

$$\text{UALBP-E: } \quad \text{Min } z'_E = mc \quad (0)$$

s.a :

$$m \geq m_{\min} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} x(j, k) = 1 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (2)$$

$$m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx(j, k) \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (3)$$

$$c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} y(j) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j^*) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} (1 - y(j)) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in F_j^*) \quad (6)$$

$$x(j, k), y(j) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (7)$$

Modelos básicos UALBP (4/4)

UALBP-F: *Satisfacer* UALBP – F : (1) – (5)

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

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \leq c_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} y(j) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j^*) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(i, k) - x(j, k)) \leq m_{\max} (1 - y(j)) \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in F_j^*) \quad (4)$$

$$x(j, k), y(j) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (5)$$

Resolución UALBP-1. Orientación tareas. Heurísticas (1/2)

Heurística básica 6: HB_6 - regla v_1 (1/2):

Paso – 0 : Inicialización

$$I_{sum} = 0; k = 1; S_k = \emptyset; T = c \text{ (} T : \text{ tiempo disponible);}$$

$$\bar{J} = J \text{ (} \bar{J} : \text{ conjunto de tareas no asignadas).}$$

Paso – 1 : Construcción del conjunto de tareas candidatas a asignar ($\hat{J} \subseteq \bar{J}$)

$$sea : \hat{J} = \{j \in \bar{J} : (t_j \leq T) \wedge ((P_j \cap \bar{J} = \emptyset) \vee (F_j \cap \bar{J} = \emptyset))\}$$

Paso – 2 : Test de cierre y apertura de estación

si $|\hat{J}| = 0$ (cierre), hacer :

$$I_{sum} \leftarrow I_{sum} + T; T = c; k \leftarrow k + 1; S_k = \emptyset; \text{Ir a Paso } -1.$$

si _no, continuar.

Resolución UALBP-1. Orientación tareas. Heurísticas (2/2)

Heurística básica 6: HB_6 - regla v_1 (2/2):

Paso – 3: Elección de la tarea asignar

$$j_{\rho}^* = \left\{ \begin{array}{l} j', \text{ si } \exists j' \in \hat{J} : (t_{j'} = T) \\ \arg \max_{j \in \hat{J}} (v_1(j) = t_j), \text{ si_no} \end{array} \right\}$$

*Paso – 4: Asignación de j_{ρ}^**

$$\text{hacer : } T \leftarrow T - t_{j_{\rho}^*}; S_k \leftarrow S_k \cup \{j_{\rho}^*\}; \bar{J} \leftarrow \bar{J} - \{j_{\rho}^*\}$$

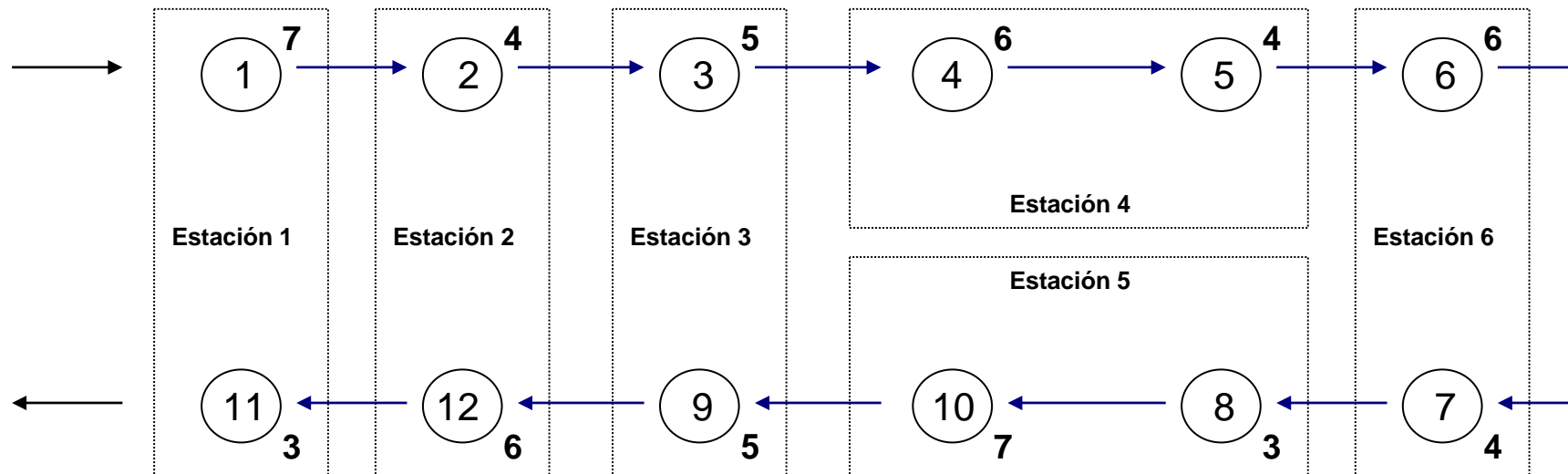
Paso – 5: Test de finalización (todas las tareas asignadas)

$$\text{si } |\bar{J}| = 0, \text{ hacer :}$$

$m = k$; mostrar resultados : S_k ($k = 1, \dots, m$); finalizar.

si_no, Ir a Paso – 1.

Líneas en U: Ejemplo-02 (una solución UALBP-1: $c=10$)



$$c = 10 \Rightarrow m = 6$$

$$t_{sum} = 60, \eta(6,10) = \frac{60}{6 \times 10} = 1.00; I_{sum} = 0$$

Ejercicio-11 (Ejemplo-02: UALBP-1; $c=12$, $c=20$)



DOE

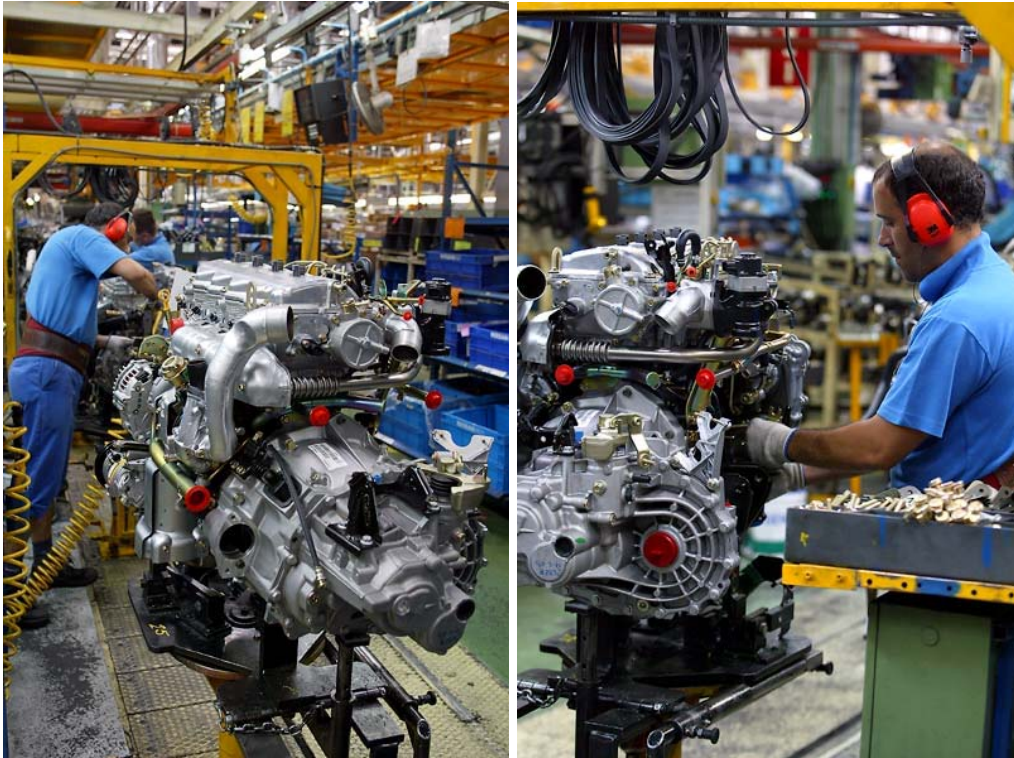
www.nissanchair.com

SAP -660

Una gama de procedimientos de resolución para ALBP

- *Exactos: programación matemática, programación dinámica*
- *Aproximados:*
 - *metaheurísticas (híbridos)*
 - *computación evolutiva*
 - *algoritmos genéticos*
 - *algoritmos meméticos*
 - *algoritmos bioinspirados*
 - *colonias de hormigas*
 - *algoritmos basados en colonias/enjambres*
 - *sistemas inmunes*
 - *computación natural*
 - *búsqueda tabú*
 - *búsqueda dispersa*
 - *enfriamiento simulado*
 - *GRASP*
 - *búsqueda basada en entornos*
 - *búsqueda local iterada*
 - *búsqueda por vecindarios*
 - *otros.*

TSALBP (*Time and Space Assembly Line Balancing Problem*) - NISSAN



DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

Problemática (1/2)

Necesidad de equilibrar:

- El diseño de una **nueva línea** destinada a la fabricación de un **nuevo producto**.
- Un nuevo equilibrado de una línea ya existente que debe dedicarse a un **nuevo producto** y a los **productos vivos** para los que fue diseñada.
- Sucesivos equilibrados a **medio-largo plazo** requeridos por la **evolución de los productos** a lo largo de sus **ciclos de vida**.
- Frecuentes equilibrados a **medio-corto plazo** ante **variaciones** de la **demanda total** o del **mix** de producción.
- Equilibrados de **emergencia** ante incidencias imprevistas como la **falta de materiales** o la **reducción** del nivel de **recursos** productivos.

Problemática (2/2)

Conflictos ante la variación de demanda y/o mix:

- Afecta al **ritmo de consumo** de **componentes** y a su **variedad**.
- Afecta a la **asignación de superficies** destinadas a los **componentes**, tanto a ambos **lados** de la línea como a las zonas de transporte **aéreo**.
- Para una **línea existente**, con una distribución en planta definida, una **nueva asignación** de superficies puede verse **condicionada** por **limitaciones de espacio** tanto lateral como aéreo.
- Los **espacios** a asignar deben **contemplar**: (1) los **RRHH** asociados a las áreas de influencia de cada estación, (2) los **materiales** (piezas y componentes) que se incorporan al producto, y (3) los **utillajes** o herramientas tanto para los procesos de fabricación como los de ensamblado.

Formalización TSALBP (1/2)

Definiciones:

- Se asocia a cada tarea j un **área requerida** a_j (función del tiempo de ciclo c , del mix de producción, de la frecuencia de suministro de materiales y de la tecnología que emplean los procesos de fabricación y de montaje).
- Se asocia a cada estación k un **área disponible** A_k (función de S_k y del layout).
- Para homogeneizar, propiciar la regularidad en la producción y simplificar, se asocia la **misma área** disponible a todas estaciones: $A_k=A$ ($1 \leq k \leq m$).
- Cada estación k requiere un **área de estación** $a(S_k)$ que es igual a la suma de las áreas requeridas por las tareas asignadas a la estación k .

Formalización TSALBP (2/2)

Enunciado TSALBP: Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem.

- Dados un conjunto de tareas J con sus atributos temporales t_j y espaciales a_j ($1 \leq j \leq |J|$).
- Un grafo de precedencias.
- Cada tarea debe asignarse a una sola estación de manera que:
 - (1) se satisfagan todas las restricciones de precedencia.
 - (2) ningún tiempo de carga de estación, $t(S_k)$, sea mayor que el tiempo de ciclo c
 - (3) ningún área requerida por estación, $a(S_k)$, sea mayor que el área disponible por estación, A .

Tipología TSALBP

- TSALBP presenta diversas variantes dependientes de los elementos m , c y A ; se proponen 8 variantes, en función de los elementos m , c y A que pueden actuar como valores fijos o como variables a optimizar.

Nombre	m	c	A	Tipo
TSALBP-F	dado	dado	dado	F
TSALBP-1	Minimizar	dado	dado	OP
TSALBP-2	dado	Minimizar	dado	OP
TSALBP-3	dado	dado	Minimizar	OP
TSALBP-1/2	Minimizar	Minimizar	dado	MOP
TSALBP-1/3	Minimizar	dado	Minimizar	MOP
TSALBP-2/3	dado	Minimizar	Minimizar	MOP
TSALBP-1/2/3	Minimizar	Minimizar	Minimizar	MOP

Las desinencias 1, 2 y 3 se refieren a la minimización de m , c y A , respectivamente. Tipo: (F) factibilidad; (OP) optimización mono-objetivo; (MOP) multi-objetivo. Cuando el problema es MOP, las desinencias 1, 2 y 3 se concatenan con “/” para nombrar el problema.

Eficiencias TSALBP

- Número mínimo de estaciones para un ciclo c y área A :

$$m_{\min}(c, A) = \max \left(\left\lceil \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \right\rceil, \left\lceil \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{|J|} a_j \right\rceil \right) \quad (\text{i})$$

- Eficiencia temporal para m estaciones y ciclo c :

$$\eta_t(m, c) = \frac{1}{mc} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \quad (\text{ii})$$

- Eficiencia espacial para m estaciones y área A :

$$\eta_s(m, A) = \frac{1}{mA} \sum_{j=1}^{|J|} a_j \quad (\text{iii})$$

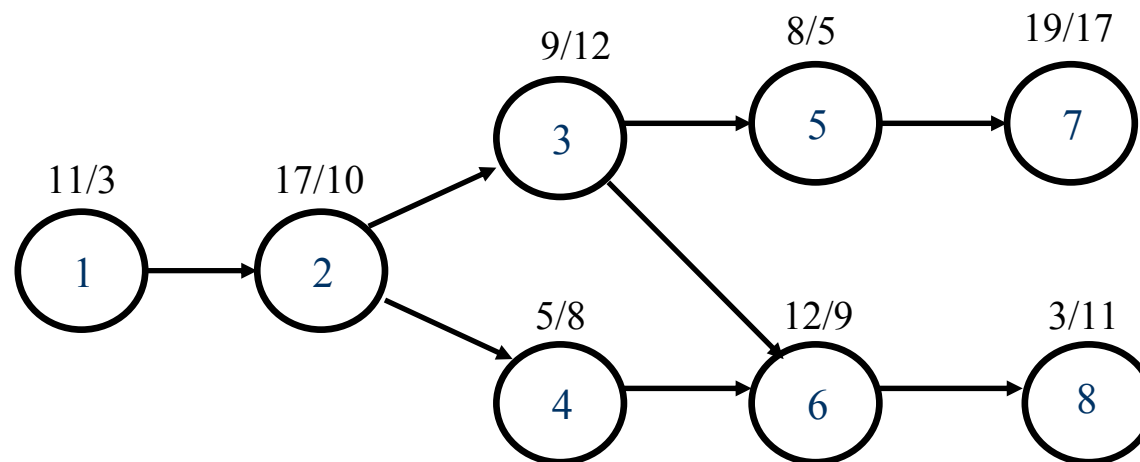
- Eficiencia máxima promedio para un ciclo c y área A :

$$\eta_{\max}(c, A) = \frac{1}{2} (\eta_t(m_{\min}(c, A), c) + \eta_s(m_{\min}(c, A), A)) \quad (\text{iv})$$

Un ejemplo TSALBP-1

BOWMAN8 de SALBP: <http://www.assembly-line-balancing.de>.

- Ocho tareas con t_j entre 3 y 17.
- Se añaden las áreas requeridas por las tareas, a_j .



Determinar los límites del tiempo de ciclo c ; el número mínimo de estaciones m_{\min} y la eficiencia máxima promedio de la línea para los ciclos 17 y 20 *ut.* y las áreas 23 y 25 *ua.*

Ejercicio-12 (Ejemplo- BOWMAN8, TSALBP-1)



DOE

www.nissanchair.com

SAP -760

Modelos básicos TSALBP (1/3)

TSALBP-F: *Satisfacer* TSALBP – F : (2) – (6)

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \leq c_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} a_j x(j, k) \leq A_{\max} \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (3)$$

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

$$\sum_{k=1}^{m_{\max}} k(x(j, k) - x(i, k)) \geq 0 \quad (1 \leq i, j \leq |J| : i \in P_j) \quad (5)$$

$$x(j, k) \in \{0, 1\} \quad (j = 1, \dots, |J|) \wedge (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (6)$$

Modelos básicos TSALBP (2/3)

Modelos OP (mono-objetivo):

$$\text{TSALBP-1: } \text{Min } z_1 = m \quad (0_1)$$

$$s.a: \quad m - \sum_{k=1}^{m_{\max}} kx(j, k) \geq 0 \quad (j = 1, \dots, |J|) \quad (1')$$

$$s.a: \quad (2) - (6)$$

$$\text{TSALBP-2: } \text{Min } z_2 = c \quad (0_2)$$

$$s.a: \quad c - \sum_{j=1}^{|J|} t_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (2')$$

$$s.a: \quad (3) - (6)$$

$$\text{TSALBP-3: } \text{Min } z_3 = A \quad (0_3)$$

$$s.a: \quad A - \sum_{j=1}^{|J|} a_j x(j, k) \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m_{\max}) \quad (3')$$

$$s.a: \quad (2), (4) - (6)$$

Modelos básicos TSALBP (3/3)

Modelos MOP (multi-objetivo):

$$\begin{array}{lll} \text{TSALBP-1/2:} & \text{Min } z_1 = m; \text{ Min } z_2 = c & (0_{1/2}) \\ & \text{s.a: } (1'), (2'), (3) - (6) & \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{TSALBP-1/3:} & \text{Min } z_1 = m; \text{ Min } z_3 = A & (0_{1/3}) \\ & \text{s.a: } (1'), (2), (3'), (4) - (6) & \end{array}$$

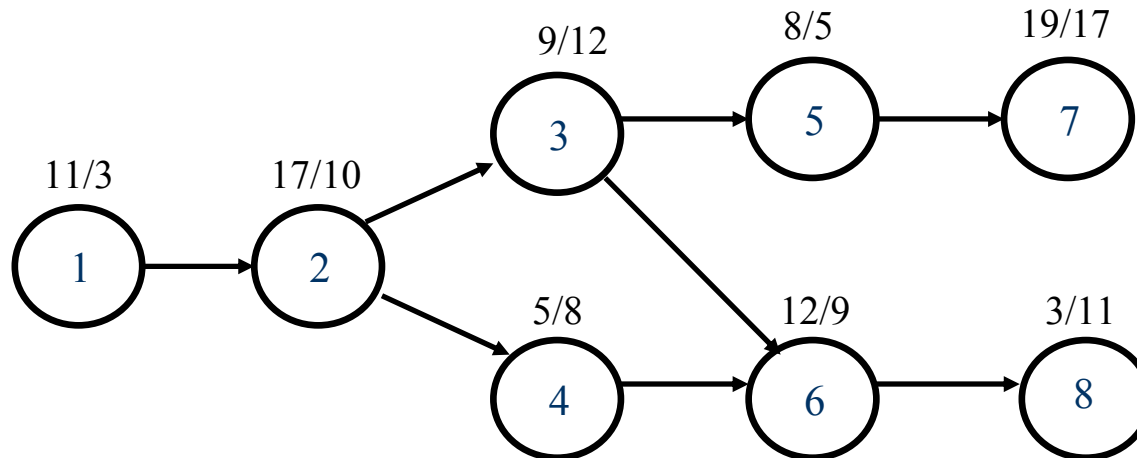
$$\begin{array}{lll} \text{TSALBP-2/3:} & \text{Min } z_2 = c; \text{ Min } z_3 = A & (0_{2/3}) \\ & \text{s.a: } (2'), (3'), (4) - (6) & \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{TSALBP-1/2/3:} & \text{Min } z_1 = m; \text{ Min } z_2 = c; \text{ Min } z_3 = A & (0_{1/2/3}) \\ & \text{s.a: } (1'), (2'), (3'), (4) - (6) & \end{array}$$

Un ejemplo TSALBP-1

BOWMAN8 de SALBP: <http://www.assembly-line-balancing.de>.

- Datos: $j=1,\dots,8$; $3 \leq t_j \leq 17$; $3 \leq a_j \leq 17$
- Se añaden las áreas requeridas por las tareas, a_j .



- Para $c=20$ la solución óptima (SALBP-1) es: $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3,5\}$, $\{4,6,8\}$, $\{7\}$; $m=5$.
- Si, además, $A=20$, entonces no existe solución con 5 estaciones.
- Para la solución anterior: $a(\{4, 6, 8\}) = 28$.
- Solución propuesta TSALBP-1: $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3,5\}$, $\{4,6\}$, $\{7\}$, $\{8\}$; $m=6$

Ejercicio-13 (Bowman8: $c=17$, $A=18$)

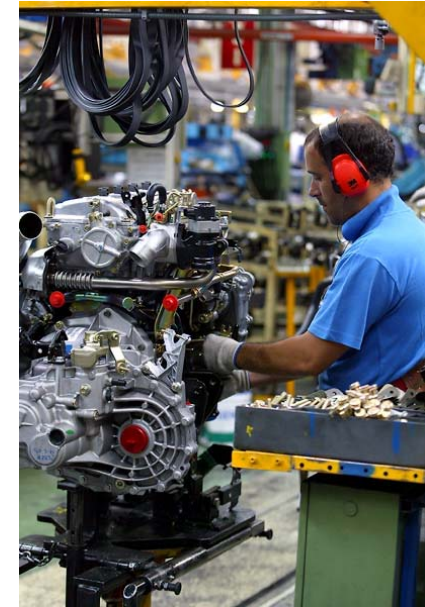


DOE

www.nissanchair.com

SAP -810

Aplicación TSALBP-1: Motor Pathfinder



- 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



Ejemplar reducido Nissan-01 (1/3)

j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1	j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1
1	50100	60	3		1	1	26	52750	5	0,5	15,16,17,18,19,20,21	3	5
2	50110	75	2	3,31	5	6	27	52760	5	0,5	15,16,17,18,19,20,21	3	5
3	50120	20	0,5	1	2	2	28	52800	30	1	22,23,24,25	4	5
4	50500	60	1	3,5	3	3	29	52820	10	0,5	28	4	6
5	50501	20	0,5	1	3	1	30	52900	15	1	29	4	6
6	50600	60	1,5	4,5	3	4	31	52901	10	0	6,7,8,30	4	6
7	50800	45	1	1	1	3	32	53050	15	0,5	31	4	6
8	50900	10	0,5	1	3	2	33	53100	30	1	32	4	7
9	51000	20	0,5	1	1	1	34	53200	10	0,5	32	5	7
10	51200	30	0,5	1	1	2	35	53300	5	0,5	36	5	7
11	51400	15	0,5	1	2	2	36	53301	25	1	32	5	7
12	51401	15	0,5	11	8	4	37	53400	15	0	32,35	5	7
13	51600	15	1	1	1	2	38	53600	5	0,5	33,34,36,37	5	7
14	51800	10	0,5	3,13	1	2	39	53630	5	0,5	33,34,36,37	5	8
15	52000	8	1	9,10,11,13,14	2	3	40	53650	5	0,5	33,34,36,37	5	7
16	52010	8	0,5	9,10,11,13,14	2	4	41	54000	60	0,5	38,39,40	6	8
17	52200	80	1	9,10,11,13,14	2	4	42	54100	15	1,5	38,39,40	5	8
18	52400	40	0,5	9,10,11,13,14	2	3	43	54120	15	1,5	38,39,40	5	8
19	52600	5	0,5	9,10,11,13,14	2	3	44	54200	25	0,5	41,42,43	6	9
20	52610	5	0,5	9,10,11,13,14	3	2	45	54210	25	0,5	41,42,43	6	9
21	52650	5	0,5	9,10,11,13,14	3	4	46	54230	5	0,5	44,45	6	9
22	52700	7	0,5	26,27	3	5	47	54240	35	0,5	46	6	9
23	52710	7	0,5	26,27	4	5	48	54250	35	0,5	46	7	9
24	52720	30	0,5	26,27	4	5	49	54260	5	0,5	42,43	5	9
25	52730	30	0,5	26,27	4	5	50	54270	15	0,5	47,48,49	7	10

Ejemplar reducido Nissan-01 (2/3)

j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1	j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1
51	54280	25	0	47,48,49	7	9	76	56020	10	1	74	10	13
52	54290	30	0	47,48,49	7	10	77	56100	15	0,5	75	10	13
53	54300	15	0	47,48,49	7	10	78	56200	15	0,5	79	10	13
54	54310	15	0	47,48,49	7	10	79	56220	15	0,5	74	10	13
55	54320	20	0	47,48,49	7	10	80	56300	10	0,5	76,77,78	10	13
56	54330	10	0	47,48,49	7	10	81	56400	10	1	76,77,78	10	14
57	54370	10	0,5	50,51,52,53,54,55,56	7	10	82	56401	10	0	80,81	10	14
58	54500	20	0,5	57,59,60	8	10	83	56420	20	0,5	82	10	14
59	54501	5	0	41	6	8	84	56430	10	0	83	10	14
60	54520	20	0,5	42,43	6	9	85	56440	20	0,5	75,84	11	14
61	54700	45	1	57,58	8	11	86	56500	25	0,5	82	10	14
62	54720	30	0,5	61	8	11	87	56600	20	0,5	82	11	14
63	54800	30	0,5	57	8	10	88	56700	15	0,25	84	11	14
64	54820	10	0,5	57	8	10	89	56750	20	0,5	88	11	15
65	55050	5	0	61,62,63,64	8	11	90	56760	30	0,5	88	11	15
66	55200	10	0,5	61,62,63,64	8	11	91	56800	20	0,5	85,86,87,88	11	14
67	55250	15	0,5	66	8	11	92	56880	25	0,5	89,90,91	11	15
68	55300	60	1,5	65,67	9	11	93	56900	10	0,5	92	13	15
69	55350	10	0,5	68	9	12	94	56920	5	0,5	89,90,91	13	15
70	55400	30	1	67	9	12	95	56940	20	0,5	94	15	15
71	55500	10	0,5	68	9	12	96	57000	10	0,5	93,95,99	15	15
72	55540	10	0,5	68	9	12	97	57050	5	0,5	93,95,99	15	15
73	55800	40	1,5	71,72	9	12	98	57100	80	0	92	12	16
74	55900	25	0,5	68,69,70,73	10	13	99	57120	30	0	89,90,91	11	15
75	56000	10	0,5	74	10	13	100	57150	10	0,5	98,99	12	16

Ejemplar reducido Nissan-01 (3/3)

j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1	j	Id.	t	a	P	S-1	TS-1
101	57160	10	0,5	98,99	12	16	121	58200	45	1,5	105,107,117,120	16	18
102	57200	20	0,5	100,101	12	16	122	58201	15	0,5	121	16	18
103	57210	30	0,5	100,101	12	16	123	58250	10	0,5	122	16	19
104	57250	5	0	102,103	12	17	124	58300	10	0	123	16	19
105	57300	30	0,5	106	13	17	125	58310	20	1	124	16	19
106	57301	25	0,5	100,101	12	16	126	58350	30	0,5	125	16	19
107	57400	5	0	100,101,104	15	17	127	58351	10	0,5	126	16	20
108	57450	5	0	100,101,104	13	17	128	58400	25	0,5	117,12	14	18
109	57500	5	0,5	108	13	17	129	58500	30	0,5	126	16	20
110	57505	5	0	108	13	17	130	58900	30	0,75	127,128,129	17	20
111	57510	10	0	109,11	13	17	131	59000	40	0,5	117,12	14	19
112	57520	10	0	109,11	13	17	132	59100	25	1	131	14	19
113	57530	15	0,5	108	13	17	133	59300	25	0,5	130	17	20
114	57540	20	0	113	13	17	134	59320	20	0,5	132	15	19
115	57550	20	0	113	13	17	135	59340	15	0,5	134	15	20
116	57700	45	1	111,112,114,115	13	17	136	59400	20	0,5	135	15	20
117	57900	20	0,5	118	14	18	137	59500	30	0,5	136	15	20
118	57950	25	0	116	14	18	138	59510	30	0,5	136	15	21
119	58000	25	0	116	14	18	139	59600	15	1	137,138	15	21
120	58050	20	0,5	119	14	18	140	59900	120	0	133,139	17	21

$|J|=140$; $c=180$; $A=4 \rightarrow$ ACO (SALBP-1 $m=17$; TSALBP-1 $m=21$)

Realizaciones TSALBP

Época: 2005; Empresa: NISSAN (BCN); UPC-Cátedra Nissan.

Algunas Referencias:

- Chica, M. ; Cordón, O. ; Damas, S. ; Pereira, J. ; Bautista, J., 2008, Incorporating Preferences to a Multi-objective Ant Colony Algorithm for Time and Space Assembly Line Balancing, Lecture Notes in Computer Science - Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, vol. 5217/2008, Springer, 331-338.
- Chica, M. ; Cordón, O. ;Damas, S. ; Bautista, J. ; Pereira, J. , 2008, Multiobjective Ant Colony Optimization Algorithm for the 1/3 Variant of the Time and Space Assembly Line Balancing Problem, IPMU'08 - Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, 1454-1461.
- Blum, C. ; Bautista, J. ; Pereira, J. , 2008, An Extended Beam-ACO Approach to the Time and Space Constrained Simple Assembly Line Balancing Problem, Lecture Notes in Computer Science - Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, vol. 4972/2008, Springer, 85-96.
- Bautista, J. ; Pereira J., 2007, Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem, European Journal of Operational Research, vol. 177/3, Elsevier, 2016-2032.
- Blum C. ; Bautista, J. ; Pereira J. , 2006, Beam-ACO applied to assembly line balancing, Lecture Notes in Computer Science - Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, vol. 4150/2006, Springer, 96-107.
- Bautista, J. ; Pereira J. , 2005, An Ant Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Additional Space Constraints, MIC 2005: 6th Metaheuristics International Conference, 95-100, Viena.



Entre líneas

“Así de puente en puente, conversando de lo que mi Comedia no se ocupa, subimos, y al llegar hasta la cima nos paramos a ver la otra hondonada de Malasbolsas y otros llantos vanos; y la ví tenebrosamente oscura.

»Como en los arsenales de Venecia bulle pez pegajosa en el invierno al reparar sus leños averiados, que navegar no pueden; y a la vez quien hace un nuevo leño, y quien embrea los costados a aquel que hizo más rutas; quien remacha la popa y quien la proa; hacen otros los remos y otros cuerdas; quien repara mesanas y trinquetas; así, sin fuego, por divinas artes, bullía abajo una espesa resina, que la orilla impregnaba en todos lados.”

[Dante Alighieri (1265-1321)]

Canto XXI, El Infierno (1304-1308). *La Divina Comedia*