



Cátedra Nissan – UPC

Innovación en la automoción

Transparencias Organización Industrial

Joaquín Bautista Valhondo, Jordi Pereira Gude

D-01/2007

Departamento de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Cataluña

Publica:

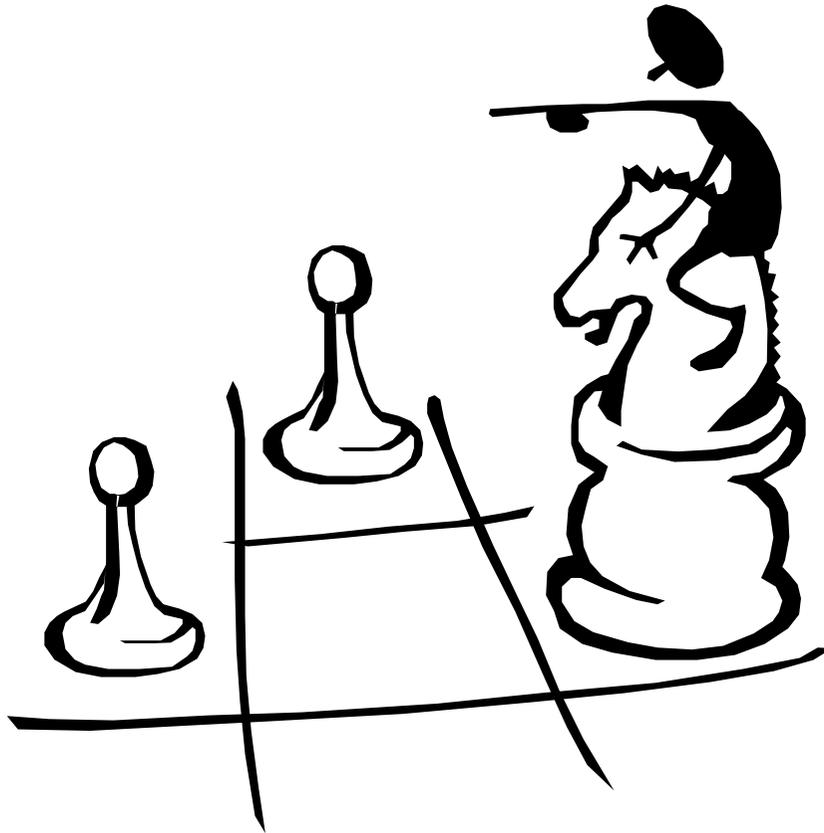
Universitat Politècnica de Catalunya
www.upc.edu



Edita:

Cátedra Nissan-UPC
www.nissanchair.com
admin@nissanchair.com

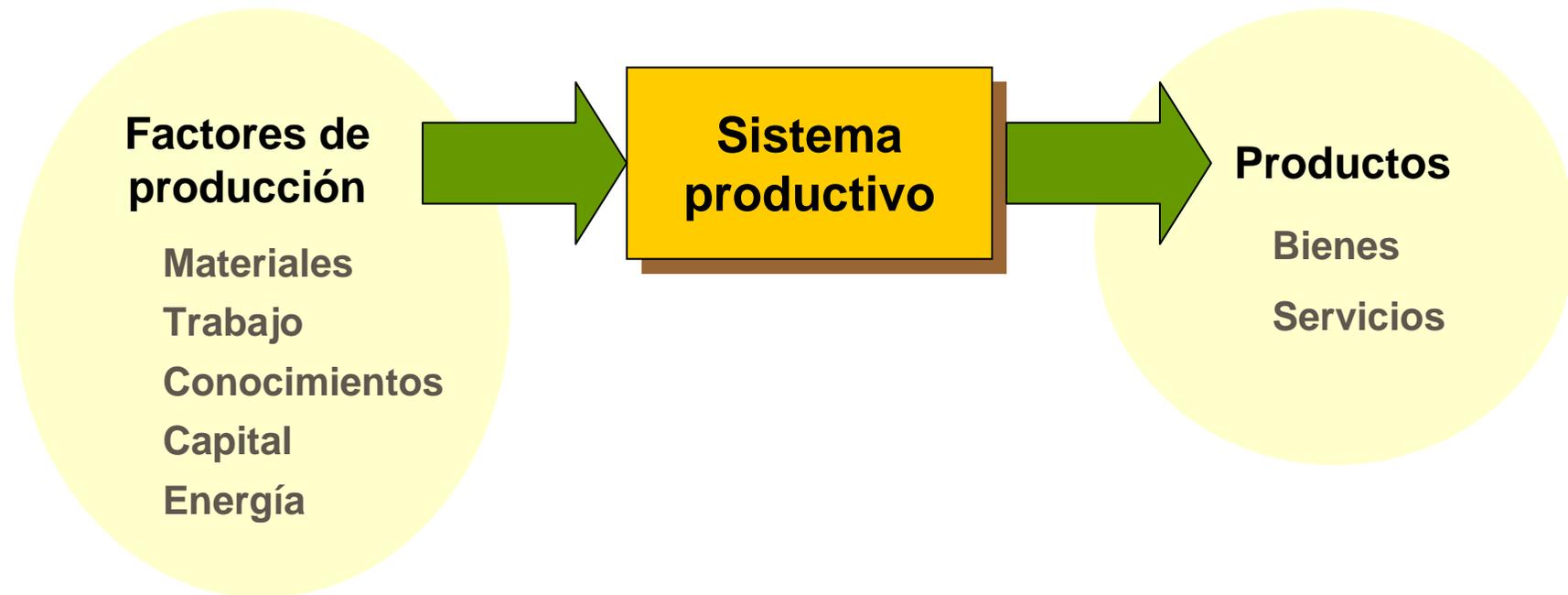
Introducció



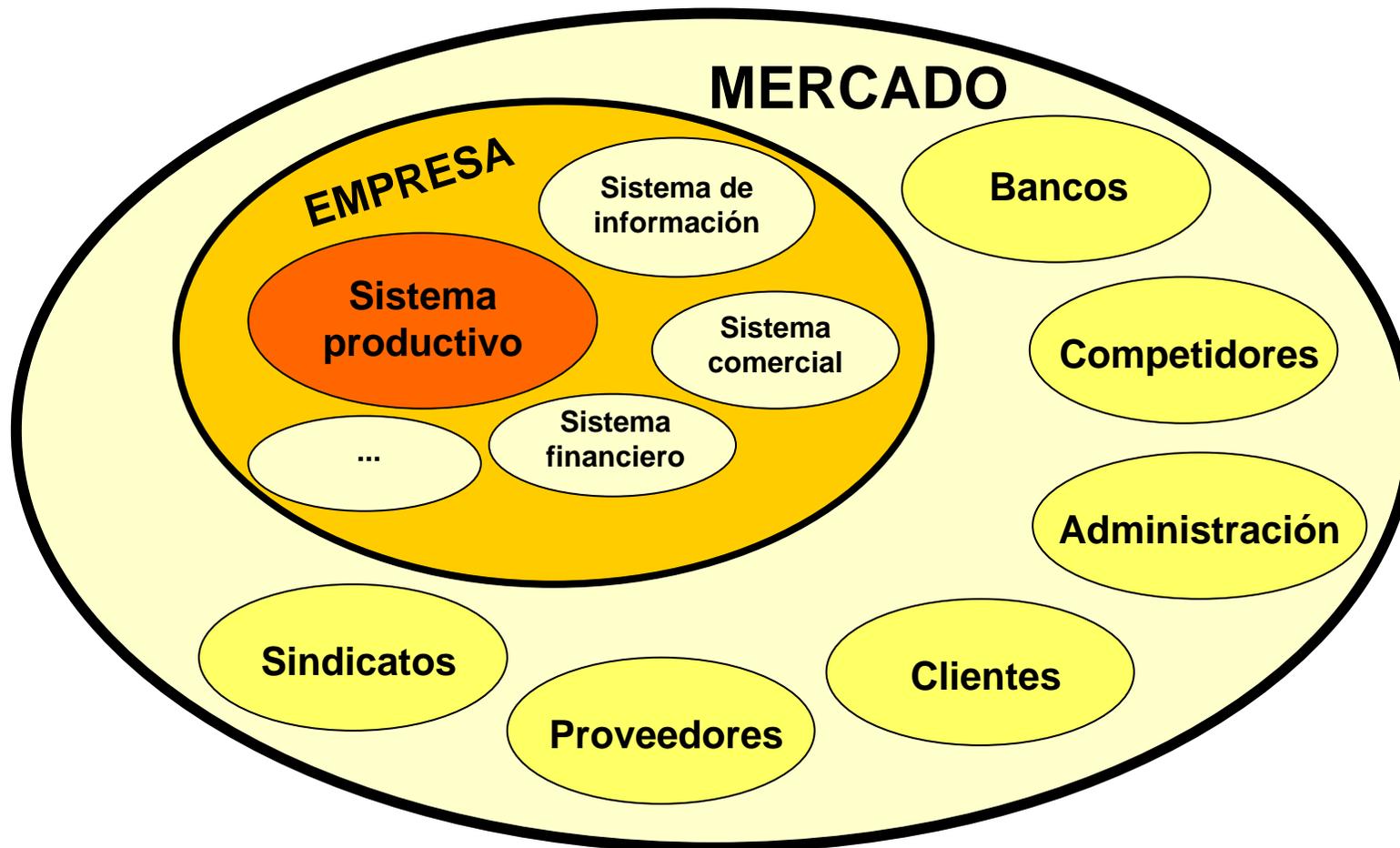
DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

El sistema productivo



Producción, empresa, mercado



Clasificación de los sistemas productivos

Según Buffa

■ A. Sistemas continuos

1. Sistemas de distribución de productos almacenables
2. Sistemas de producción-distribución de productos normalizados con volumen importante

Cadenas de montaje, procesos químicos continuos, paquetería, restaurantes de autoservicio,...

■ B. Sistemas intermitentes

3. Talleres cerrados para productos almacenados (bajo catálogo)
4. Talleres abiertos para productos bajo pedido
5. Proyectos singulares

Talleres, hospitales, procesos químicos por lotes, empresas de consultoría,...

Decisiones en los sistemas productivos según Buffa

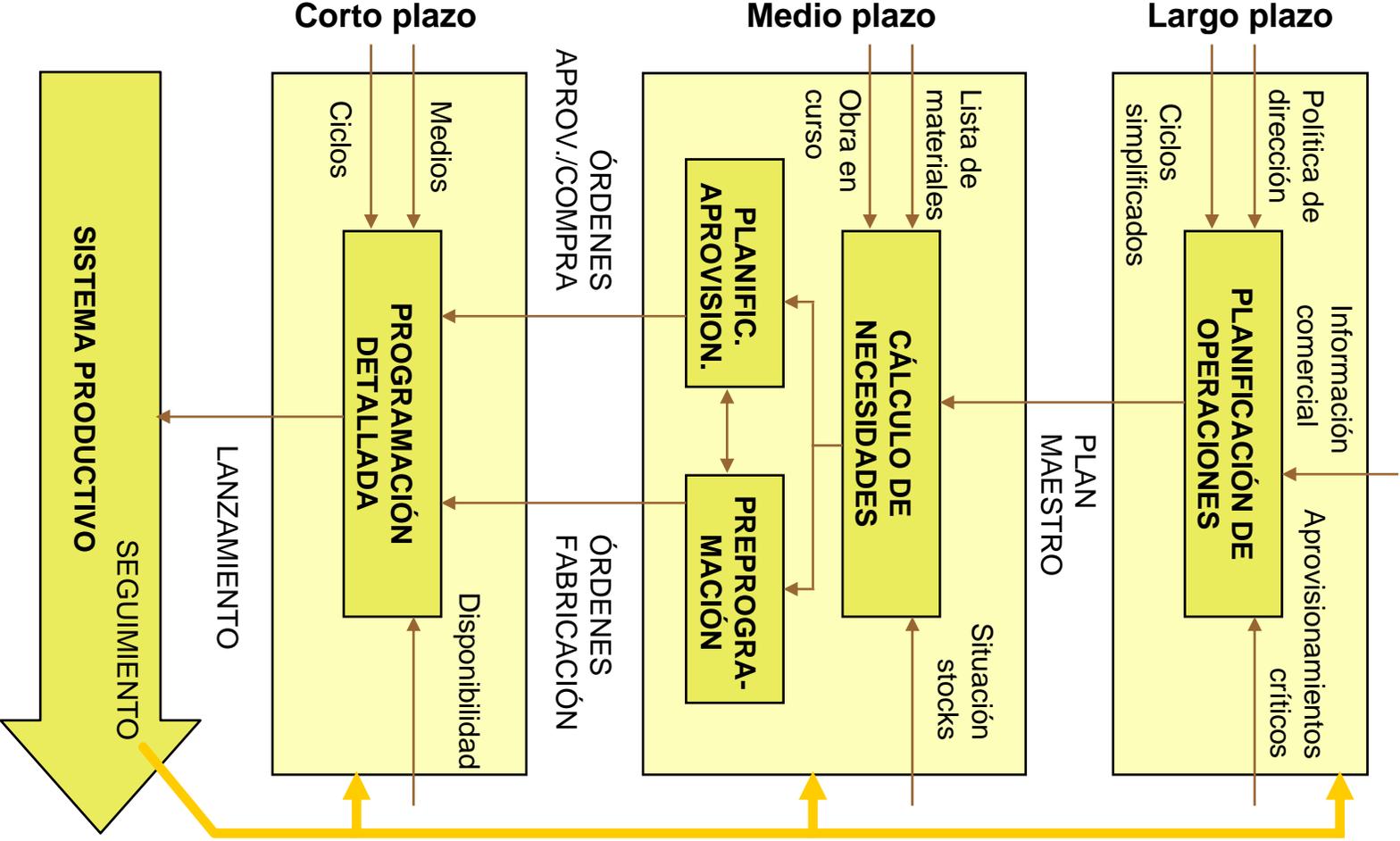
Decisiones de diseño del sistema productivo:

1. Previsión y planificación a largo plazo
2. Diseño productivo de los elementos fabricados
3. Distribución en planta
4. Selección de equipos y procesos
5. Localización del sistema productivo
6. Diseño de tareas y medida del trabajo

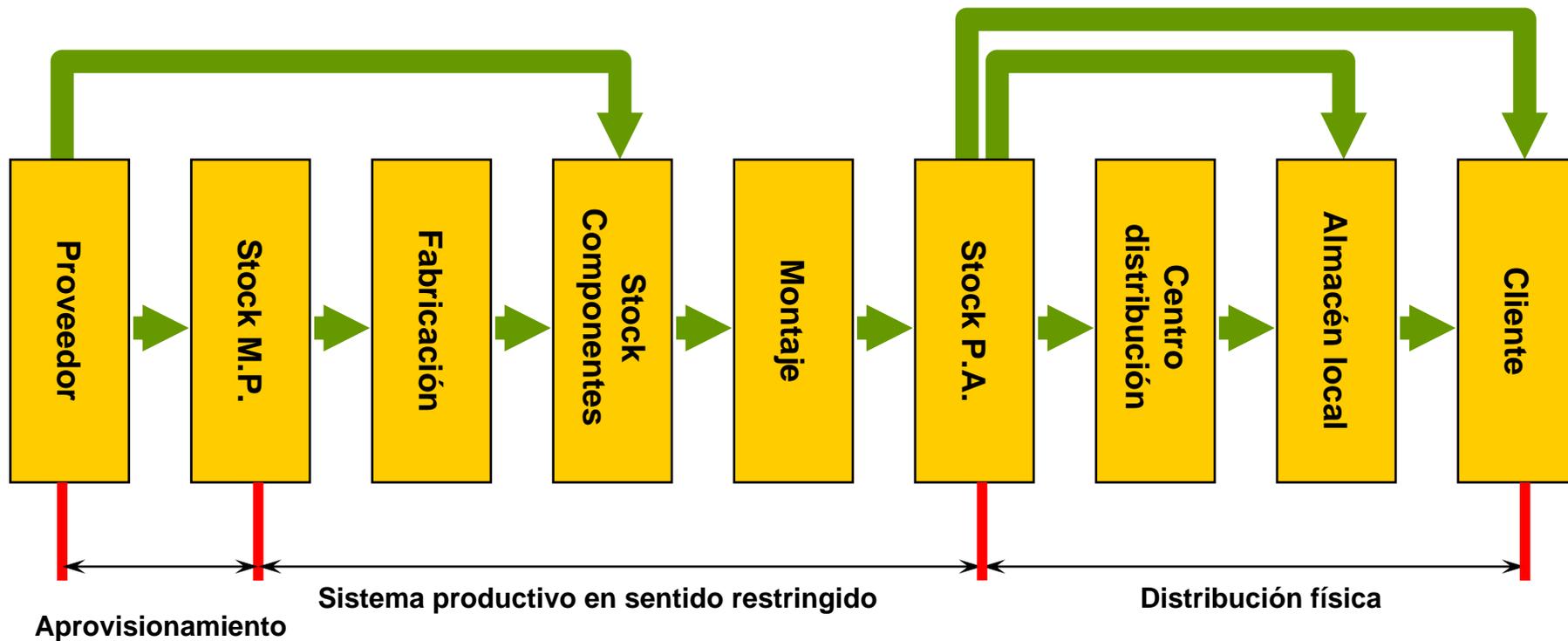
Decisiones de dirección de operaciones:

1. Previsión de la demanda
2. Planificación de operaciones
3. Cálculo de necesidades y gestión de materiales
4. Programación y control de operaciones
5. Fiabilidad y mantenimiento del sistema productivo
6. Gestión de la calidad
7. Control de costes y de la mano de obra

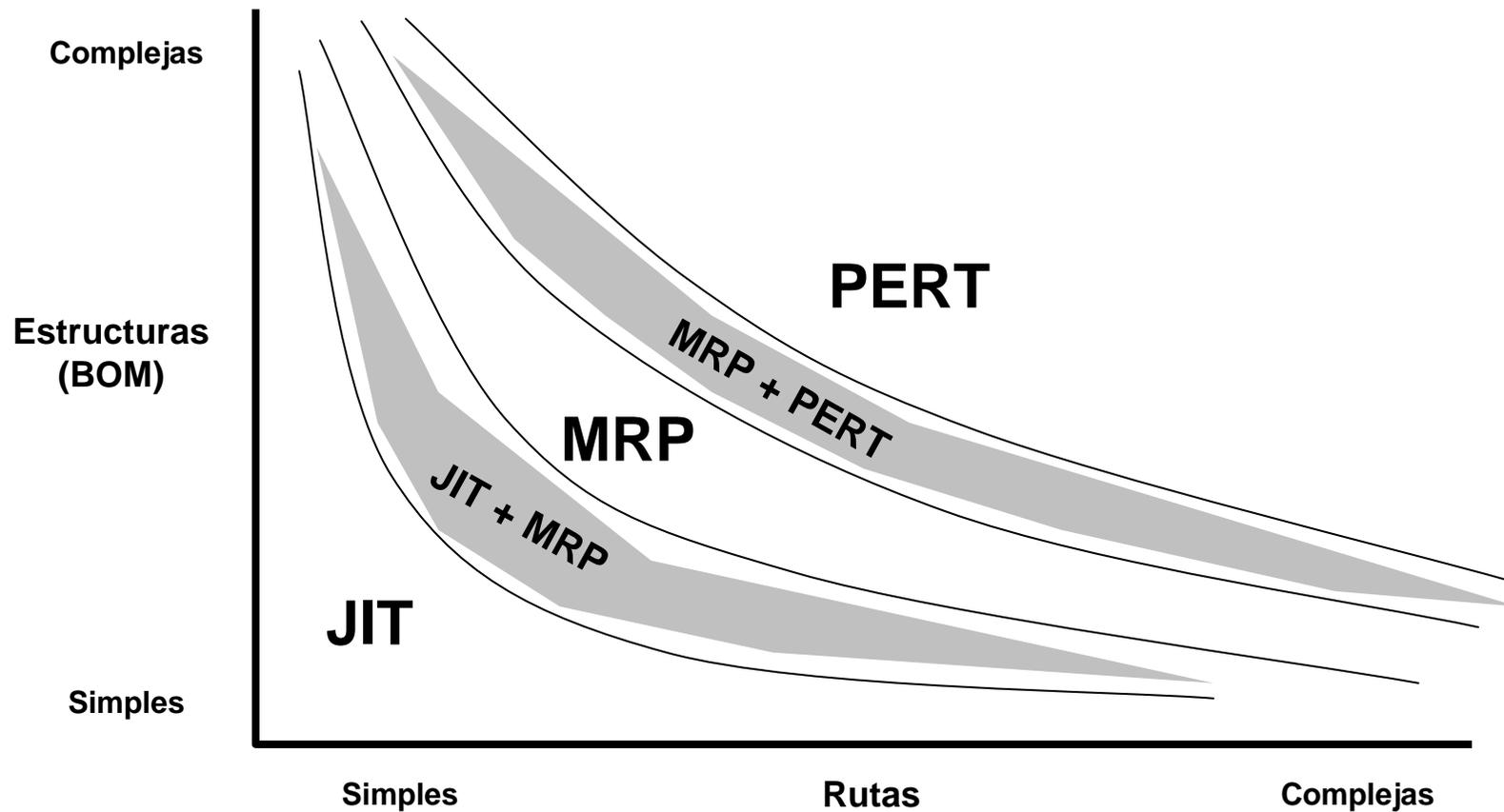
Los 3 niveles de decisión en DO



Sistema logístico o productivo en sentido amplio



Sistemas de gestión



Costes e inversiones



DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

Definición de coste

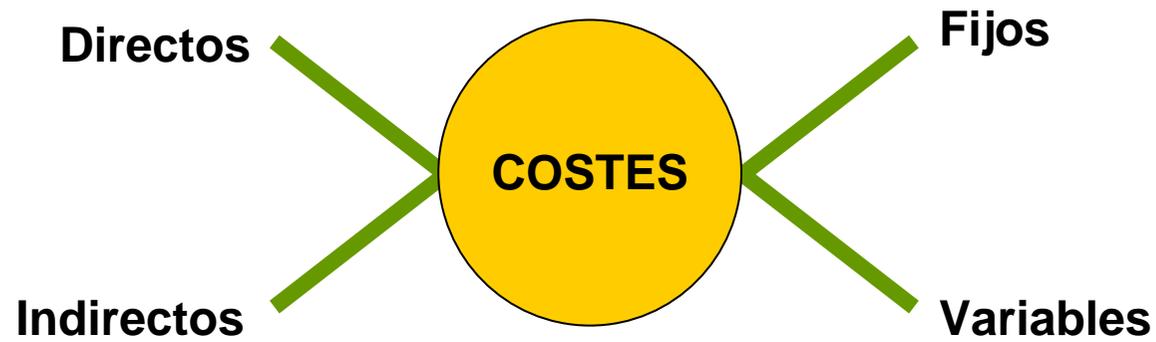
Valor de los recursos necesarios para la OBTENCIÓN, REALIZACIÓN o FUNCIONAMIENTO de un ELEMENTO

■ Ejemplos:

- ◆ Unidad de producto
- ◆ Operación
- ◆ Sección del sistema productivo
- ◆ Proceso



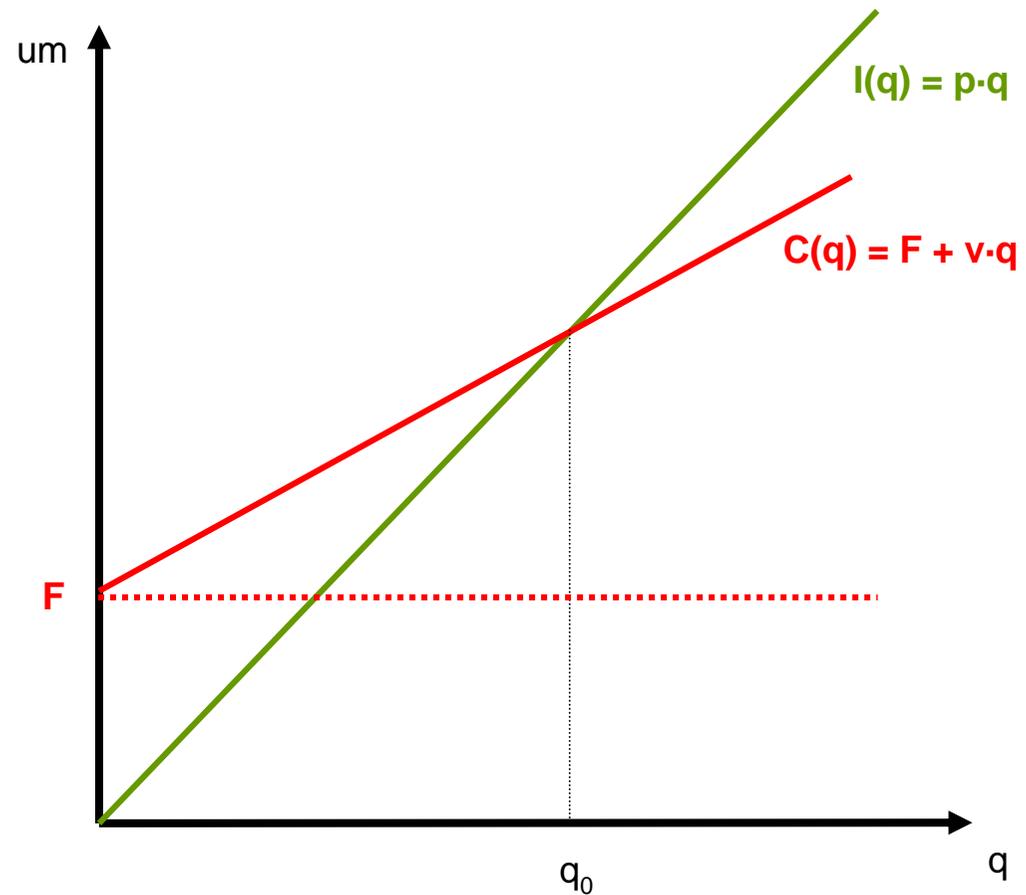
Clasificación de los costes



	DIRECTOS	INDIRECTOS
FIJOS	<ul style="list-style-type: none">■ Sueldo de la mano de obra directa	<ul style="list-style-type: none">■ Alquiler del local■ Dirección
VARIABLES	<ul style="list-style-type: none">■ Incentivos■ Componentes	<ul style="list-style-type: none">■ Energía

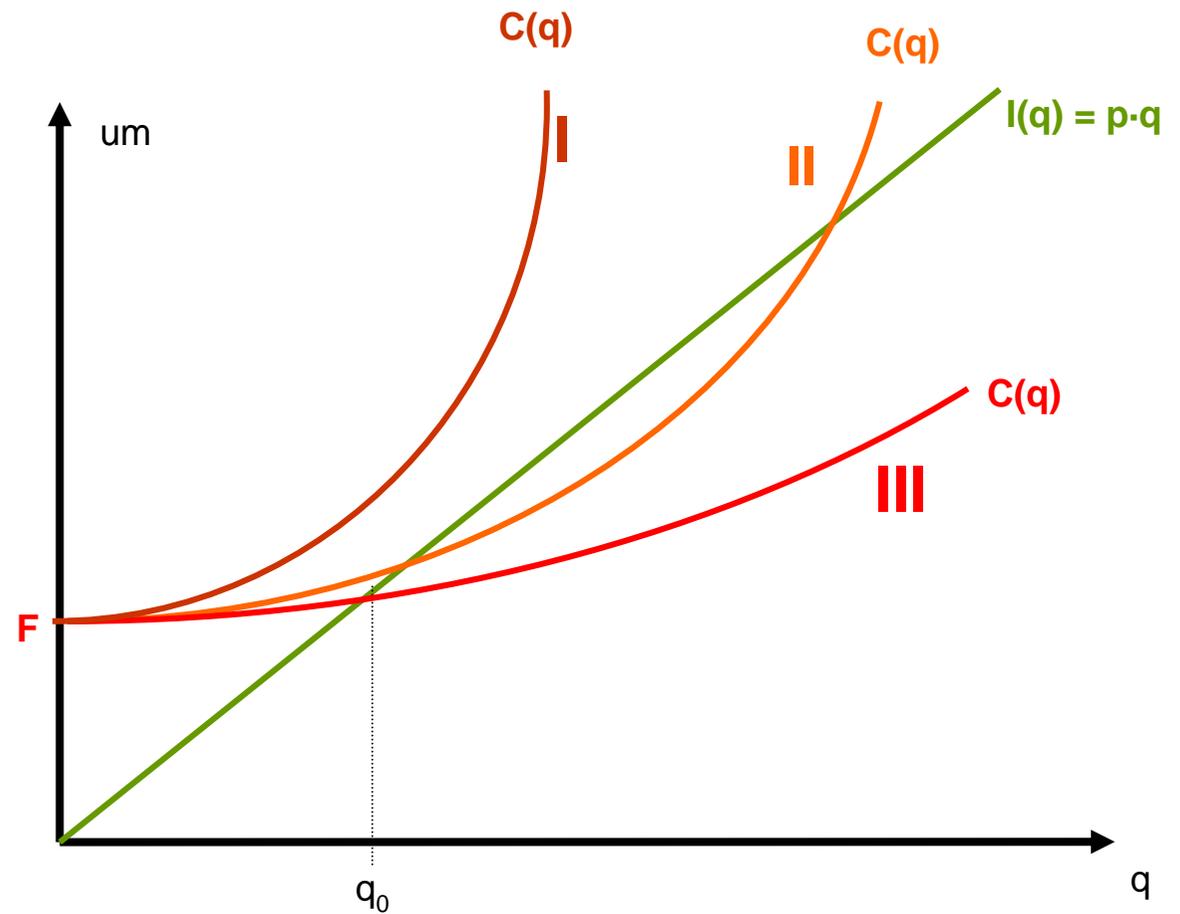
Punto de equilibrio

- $C(q) = F + V(q) = I(q)$
- $F + v \cdot q = p \cdot q \rightarrow q_0 = \frac{F}{p - v}$
- $p - v \equiv$ Margen unitario



Punto de equilibrio

- I → Inviabile
- II → 2 puntos de equilibrio
- III → Economías de escala



Conceptos relacionados con las inversiones

■ Concepto de inversión

- ◆ CONCEPTO: Renunciar a unas satisfacciones inmediatas a cambio de unas expectativas (esperanza de beneficios futuros).
- ◆ INVERSIÓN: (CONTEXTO EMPRESARIAL) Proceso que implica pagos inmediatos y cobros futuros.

■ Cobros, pagos, ingresos y gastos

- ◆ COBRO: Entrada o recepción de dinero.
- ◆ PAGO: Salida o emisión de dinero.
- ◆ INGRESO: Intención de COBRO (ESPERANZA).
- ◆ GASTO: Intención de PAGO (ESPERANZA).

■ Horizonte y periodo

- ◆ HORIZONTE: Tiempo durante el cual se producirán cobros y pagos.
- ◆ PERIODO: Porción de tiempo (PATRÓN) en que se divide, equitativamente, el horizonte.

Movimiento de fondos

Conceptos	Horizonte								
	0	1	2	...	...		...	...	T
P ₁									
P ₂									
...									
P _m									
Total pagos (a)									
C ₁									
C ₂									
...									
C _n									
Total cobros(b)									
Movimiento de fondos (b)-(a)	S ₀	S ₁	S ₂	...	...	S _t	...	...	S _T

Movimiento de Fondos: Lista de valores, uno por período, que son la diferencia entre el total de cobros y el total de pagos.

Ejemplo de aplicación

	M (Proceso manual)	A1 (Proceso automático, pequeña capacidad)	A2 (Proceso automático, gran capacidad)
Capacidad (un/año)	120	100	120
Coste fijo (um/año)	50	150	250
Coste variable (um/un)	9	7	6
Inversión inicial (um)	130	400	450

Año	1	2	3	4	5
Demanda	60	90	100	110	120

Precio de venta: 10 um

Movimiento de fondos del proyecto A1

Concepto	Horizonte					
	0	1	2	3	4	5
Inversión	400	--	--	--	--	--
Coste fijo	--	150	150	150	150	150
Coste variable	--	420	630	700	700	700
Total pagos	400	570	780	850	850	850
Total cobros (ventas)	--	600	900	1000	1000	1000
Movimiento de fondos	- 400	30	120	150	150	150

Movimiento de fondos para los tres proyectos

Proyecto	Horizonte					
	0	1	2	3	4	5
M	- 130	10	40	50	60	70
A1	- 400	30	120	150	150	150
A2	- 450	-10	110	150	190	230

Dimensión y período de retorno

Proyecto	Movimiento de fondos acumulado						Dimensión	Período retorno
	0	1	2	3	4	5		
M	- 130	- 120	- 80	- 30	30	100	130	3.50 años
A1	- 400	- 370	- 250	- 100	50	200	400	3.67 años
A2	- 450	- 460	- 350	- 200	-10	220	460	4.04 años

Comparación de inversiones

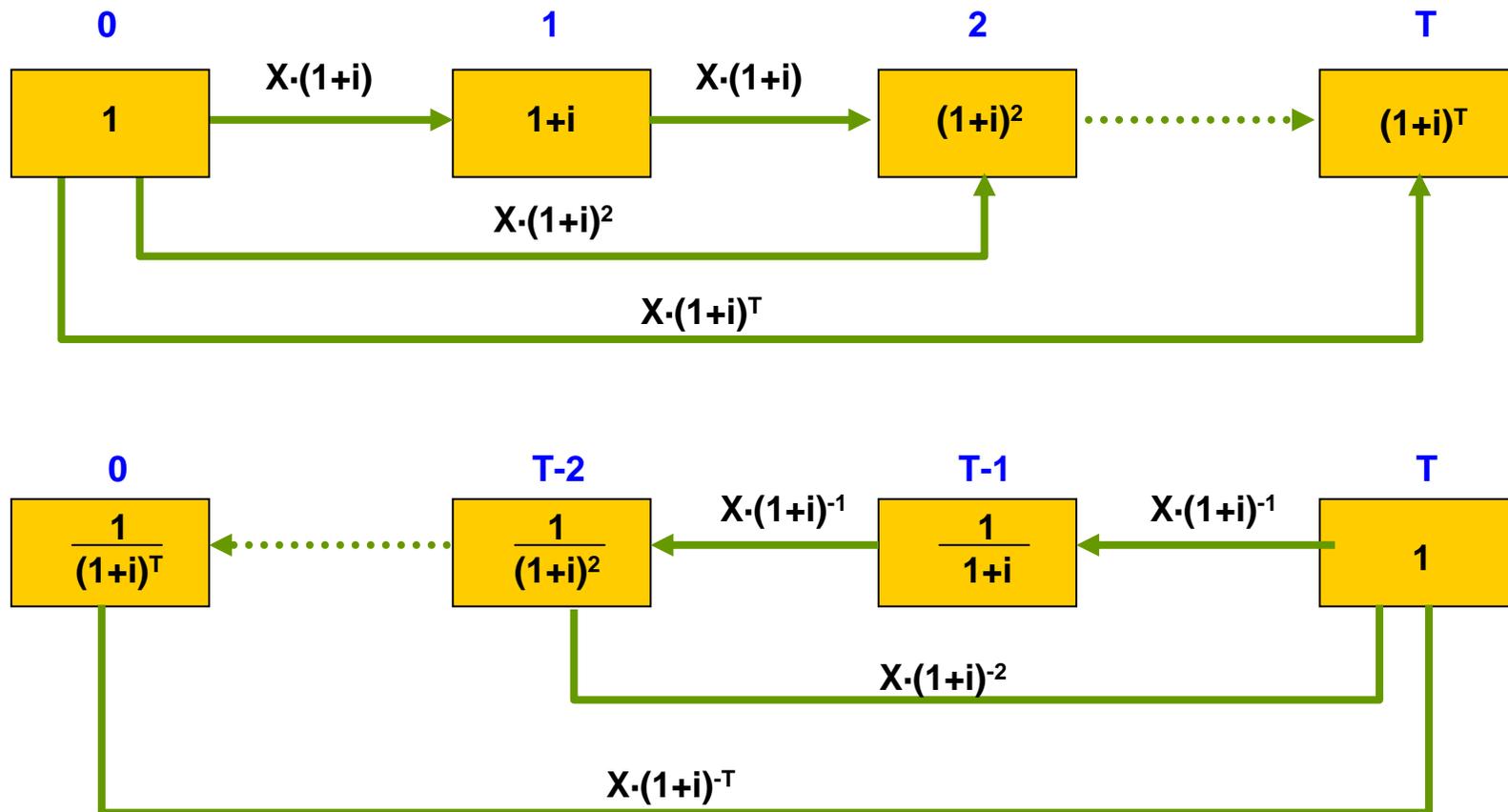
- **RENTABILIDAD:** Un proyecto es rentable si el valor de los rendimientos que proporciona es superior al de los recursos que utiliza.
- **SEGURIDAD:** Predilección por resultados más ciertos
MENOR RIESGO.
- **LIQUIDEZ:** Facilidad con que se puede cambiar por dinero el objeto de la inversión.

Comparación intertemporal de unidades monetarias

- **TASA DE INTERÉS NOMINAL:** Coste del alquiler del dinero referido a unidades monetarias corrientes.
- **TASA DE INFLACIÓN:** Tasa de variación del nivel de precios.
- **TIPO DE INTERÉS REAL:** Coste del alquiler del dinero en unidades monetarias constantes.

$$i = \frac{(1 + t_n)}{(1 + t_i)} - 1$$

Capitalización y actualización o descuento



Cálculo del VAN

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{S_t}{(1+i)^t}$$

■ Cálculo del VAN para $i = 0.1$ (10%)

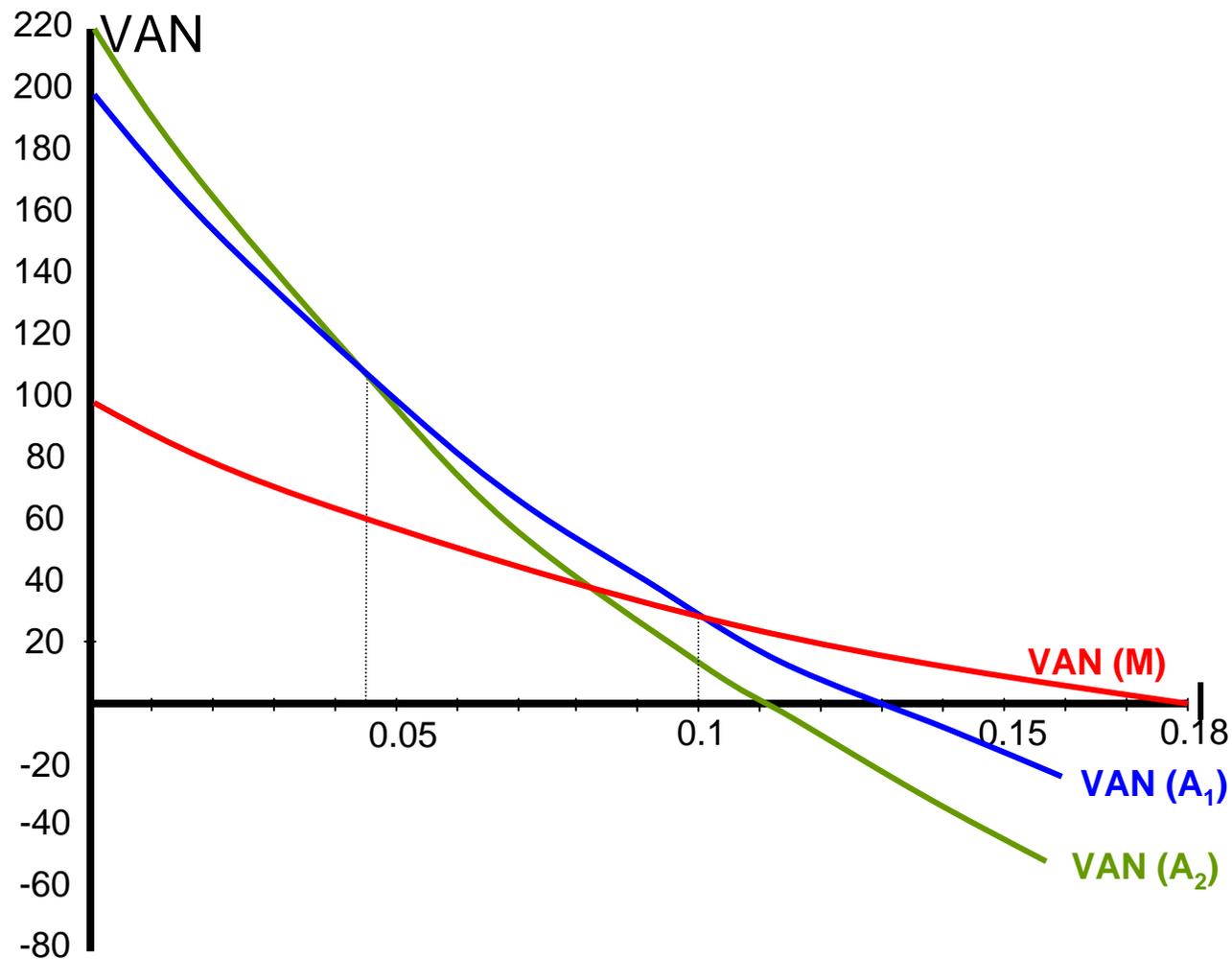
$$VAN(M) = -130 + \frac{10}{1.1} + \frac{40}{1.1^2} + \frac{50}{1.1^3} + \frac{60}{1.1^4} + \frac{70}{1.1^5} = 34.16$$

$$VAN(A_1) = 34.73$$

$$VAN(A_2) = 17.10$$

■ Para $i = 0.1$ el mejor proyecto es A1

Representación gráfica del VAN de los proyectos M, A1 y A2



Cálculo de la anualidad y del TIR

Anualidad:

$$VAN = a \cdot \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+i)^t} = a \cdot \frac{\frac{1}{1+i} - \frac{1}{(1+i)^T} \cdot \frac{1}{1+i}}{1 - \frac{1}{1+i}} = a \cdot \frac{1 - \frac{1}{(1+i)^T}}{i}$$

$$a = \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^T}} \cdot VAN$$

TIR:

i tal que $VAN = 0$

Comparación resultados ejemplo de aplicación

Crterios	Orden de los proyectos		
TIR	M	A1	A2
VAN (i = 0)	A2	A1	M
VAN (i = 0.07)	A1	A2	M
VAN (i = 0.09)	A1	M	A2
VAN (i = 0.11)	M	A1	A2

Riesgo. Fluctuación de la demanda. Ejemplo

Hipótesis	Año				
	1	2	3	4	5
H ₀ optimista (+20%)	72	108	120	132	144
H _m medio	60	90	100	110	120
H _p pesimista (-20%)	48	72	80	88	96

Las fluctuaciones pueden afectar a la demanda y/o capacidad

Capacidad	M	120
	A1	100
	A2	120

Riesgo. Fluctuación de la demanda. Resultado.

Movimiento de fondos							
Hipótesis	0	1	2	3	4	5	VAN
H_0	- 400	66	150	150	150	150	92.25
H_m	- 400	30	120	150	150	150	34.73
H_p	- 400	- 6	66	90	114	138	-119.74

Si las probabilidades atribuidas a H_0 , H_m , H_p son, respectivamente:

0.3 ; 0.5 ; 0.2

la esperanza matemática del VAN es:

$$0.3 \cdot 92.25 + 0.5 \cdot 34.73 + 0.2 \cdot (-119.74) = 21.09$$

Gestión de stocks

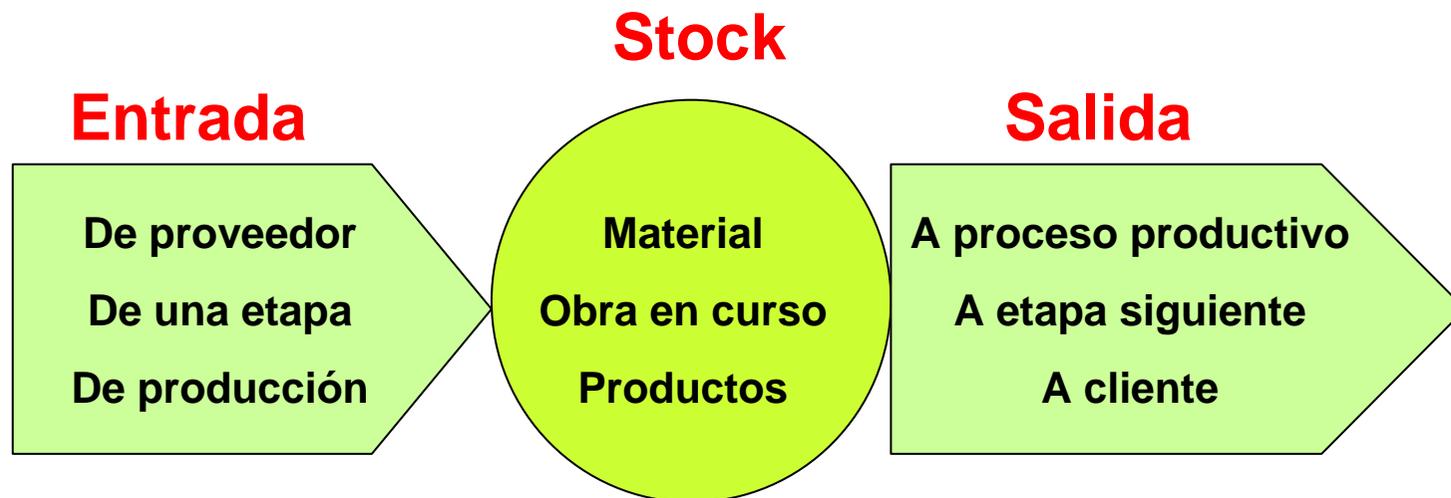
Modelos deterministas



Departament
d'Organització
d'Empreses

Concepto de stock

Un stock es una reserva no empleada que posee valor económico



Clasificación de los stocks

■ Según su motivo

- ◆ Especulativos
- ◆ De equilibrado
 - De tránsito
 - Amortiguador
 - De anticipación
 - De desacoplamiento
 - De ciclo

■ Según su naturaleza

- ◆ Materia prima
- ◆ Repuestos y suministros
- ◆ Obra en curso
- ◆ Productos semielaborados
- ◆ Componentes
- ◆ Productos acabados
- ◆ Subproductos, residuos y materiales de desecho
- ◆ Envases y embalajes

Costes asociados a la gestión de stocks

■ Coste de Lanzamiento

- ◆ Independiente de las unidades adquiridas (Cl) – $um/lanz.$ -

■ Coste de adquisición unitario

- ◆ Variable (Ca) – um/up -

■ Coste de posesión (Cs)

- ◆ Creación y mantenimiento de la capacidad de almacenaje
- ◆ Movimiento de artículos en stock
- ◆ Variación del valor de los bienes (obsolescencia, caducidad, robos,...)
- ◆ Costes de seguridad
- ◆ Cargas financieras del capital inmovilizado
- ◆ – $um/(up \cdot ut)$ -

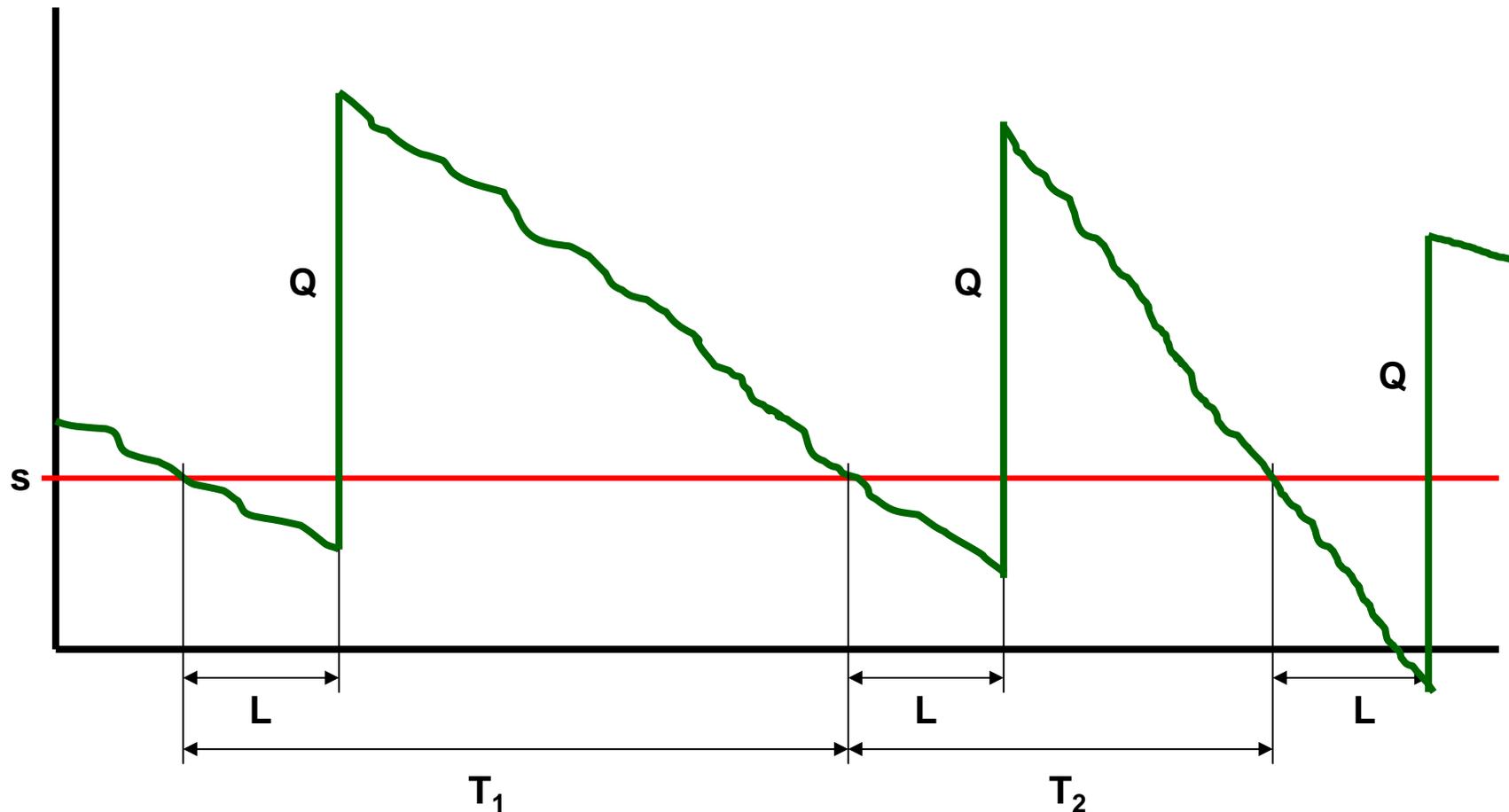
■ Costes de insatisfacción de la demanda

- ◆ Demanda insatisfecha diferida.
Coste de diferir (Cd) - $um/(up \cdot ut)$ -
- ◆ Demanda insatisfecha perdida.
Coste de rotura (Cr) - $um/(up \cdot ut)$ -

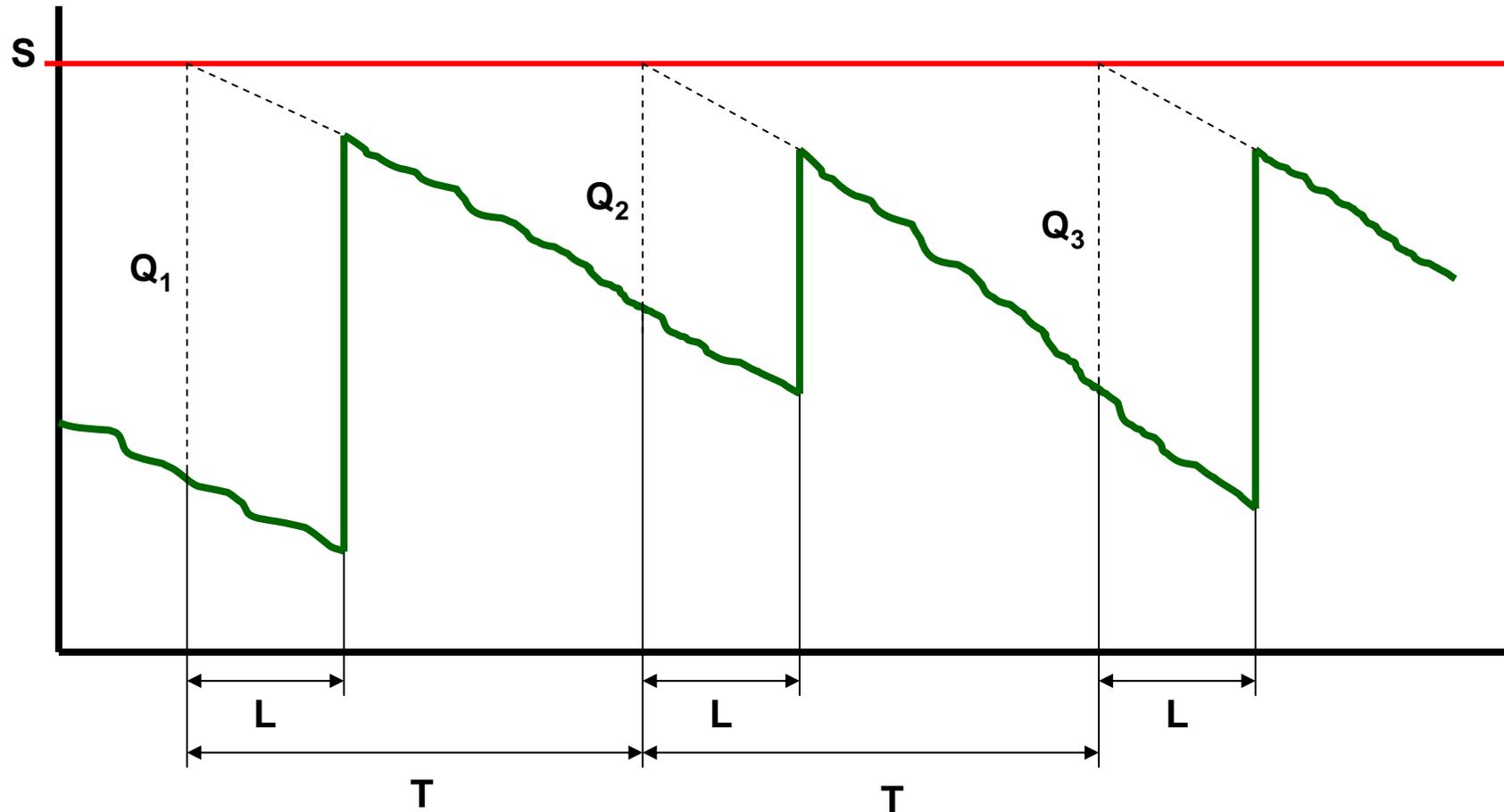
■ Otros costes

- ◆ Costes de información y control
- ◆ Costes asociados a la variación de capacidad
- ◆ ...

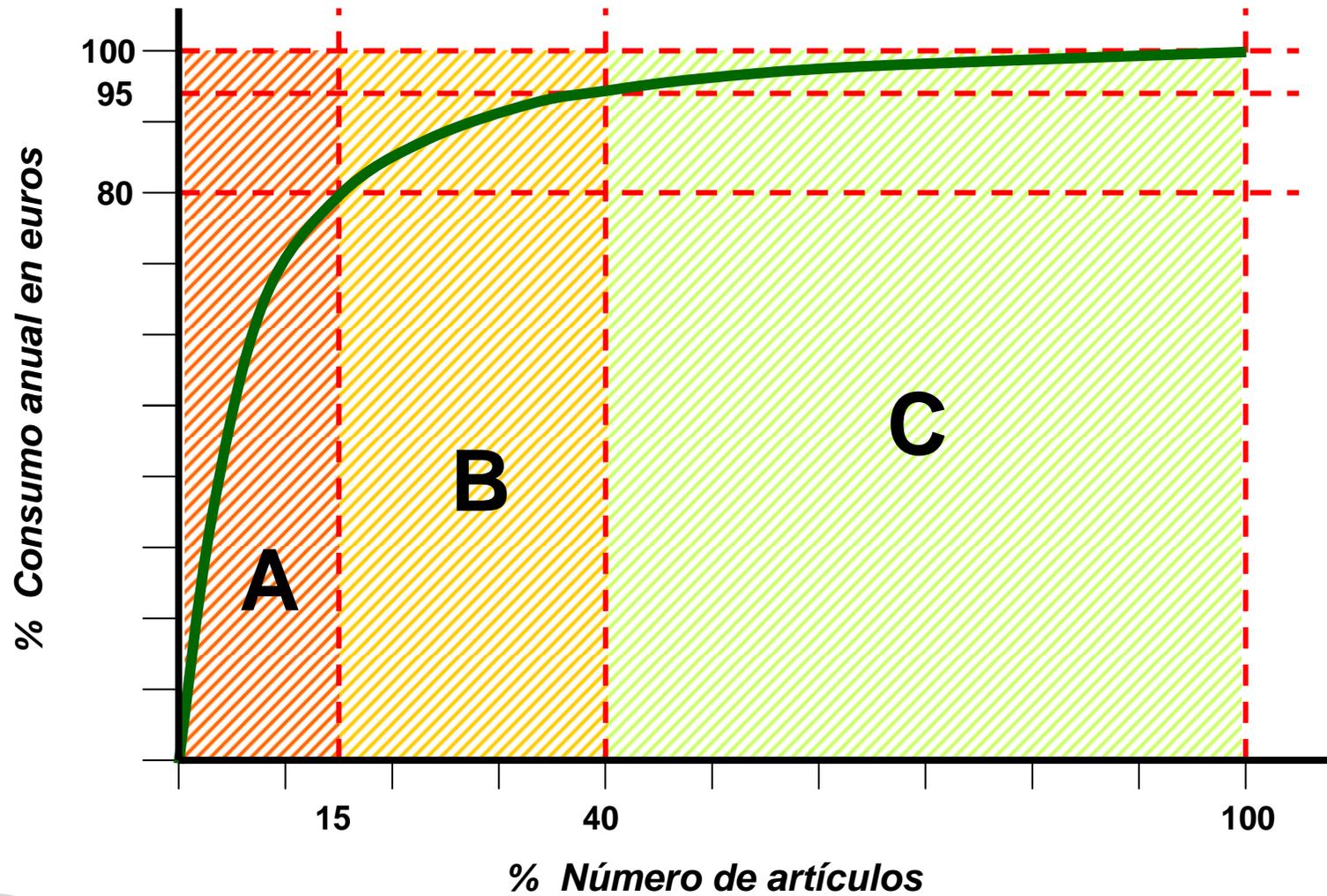
Gestión por punto de pedido



Gestión por aprovisionamiento periódico



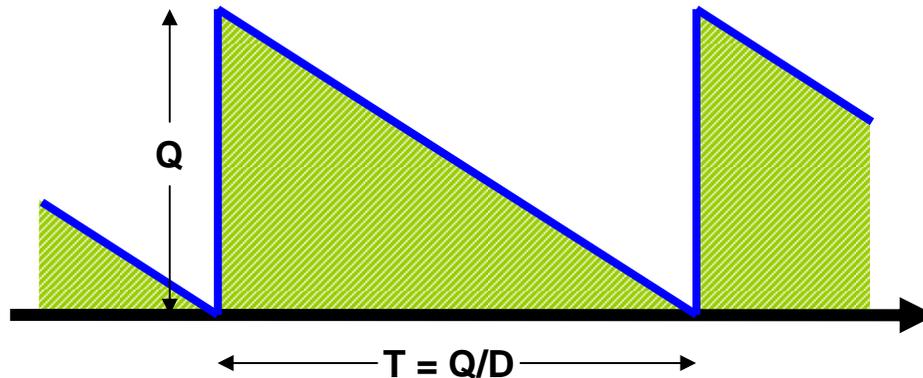
Análisis ABC



Modelo de Harris-Wilson: hipótesis

- **Demanda constante, conocida, homogénea, D (unidad/año).**
- **Plazo de entrega constante y conocido, L .**
- **No se aceptan roturas.**
- **Coste variable de adquisición, C_a (um/unidad), constante e independiente del tamaño del lote.**
- **Entrada instantánea del lote.**
- **Coste de lanzamiento C_l (um/lanz.).**
- **Coste de posesión C_s (um/unidad-año) [en muchas circunstancias $C_s = i \cdot C_a$, donde i es una tasa anual de posesión].**

Modelo de Harris-Wilson



Coste medio anual = coste de lanzamiento
+ coste de adquisición + coste de posesión

$$K(Q) = Cl \frac{D}{Q} + Ca D + Cs \frac{Q}{2}$$

$$Q^* = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{Cl}{Cs}}$$

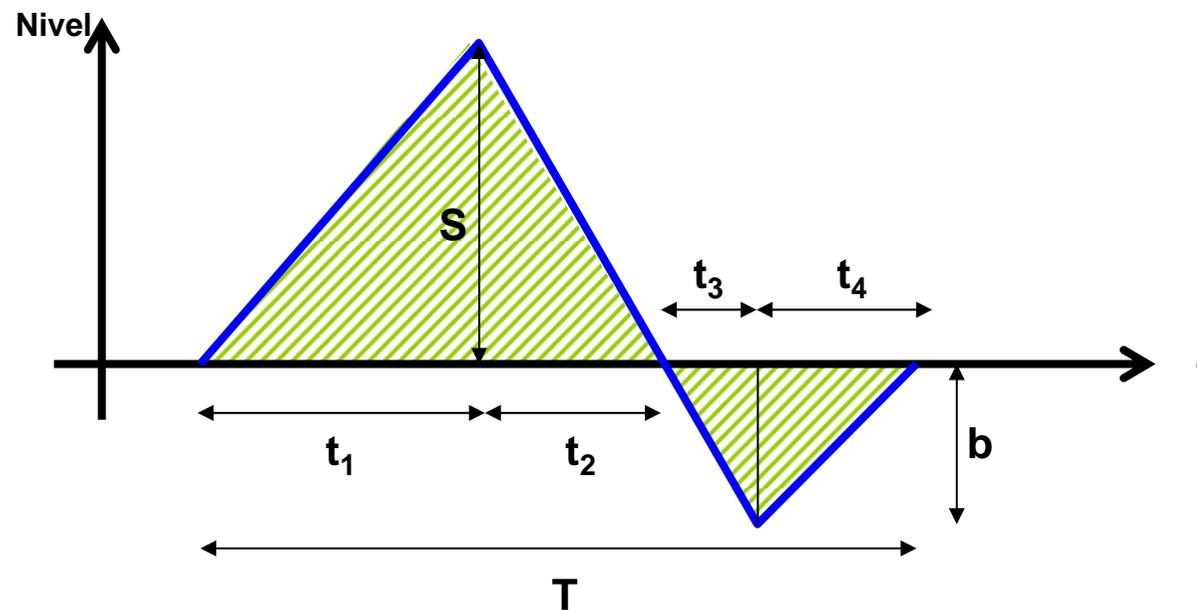
$$K^* = K(Q^*) = Ca \cdot D + \sqrt{2 \cdot D \cdot Cl \cdot Cs}$$

$$T^* = \sqrt{\frac{2 \cdot Cl}{D \cdot Cs}} \quad N^* = \sqrt{\frac{D \cdot Cs}{2 \cdot Cl}}$$

Fórmula general (basada en Harris-Wilson)

■ Relajación de hipótesis:

- ◆ La entrada del lote en stock es progresiva a la tasa de P unidades/año, siendo $P > D$.
- ◆ Se puede diferir la entrega y la penalizamos con C_d - um/unidad-año -.



Fórmula general con posibilidad de diferir (I)

- $S=(P-D) \cdot t_1=D \cdot t_2$
 $b=D \cdot t_3=(P-D) \cdot t_4$
 $Q=D \cdot T=P \cdot (t_1+t_4)$
 $Q=D(t_1+t_2+t_3+t_4)=D(t_1+t_4)+S+b$

$$Q = (S+b) / (1 - D/P)$$

- Coste por periodo:
 $k = Cl + Ca \cdot Q + Cs \cdot (t_1+t_2) \cdot S/2 + Cd \cdot (t_3+t_4) \cdot b/2$

- Coste medio anual:
 $K(Q,b) = Cl \cdot D/Q + Ca \cdot D + Cs \cdot S/2 \cdot (t_1+t_2)/T + Cd \cdot b/2 \cdot (t_3+t_4)/T$

- Razón de carencia o fallo: $\rho = \frac{Cd}{(Cd + Cs)}$

- Obtenemos que el óptimo es:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl}{Cs} \cdot \frac{1}{\rho \cdot (1 - D/P)}}$$

$$S^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl}{Cs} \cdot \rho \cdot (1 - D/P)}$$

$$b^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot Cl}{Cd} \cdot (1 - \rho) \cdot (1 - D/P)}$$

$$K^* = Ca \cdot D + \sqrt{2 \cdot D \cdot Cl \cdot Cs \cdot \rho \cdot (1 - D/P)}$$

- El modelo se reduce al anterior si:

$$\rho = 1$$

$$P \rightarrow \infty$$

Coste de adquisición en función del lote

■ $K(Q) = CL \cdot D/Q + CA(Q) \cdot D + CS \cdot Q/2$

■ $\frac{\partial K}{\partial Q} = -CL \cdot \frac{D}{Q^2} + D \frac{dCA}{dQ} + \frac{CS}{2} = 0$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot CL \cdot D}{CS + 2 \cdot D \cdot \left(\frac{dCA}{dQ}\right)}}$$

■ **Resolución por procedimiento iterativo**

$$Q^{(k+1)} = \left[\frac{2 \cdot CL \cdot D}{CS + 2 \cdot D \cdot \left(\frac{\Delta CA}{\Delta Q^{(k)}}\right)} \right]^{1/2} \quad \frac{\Delta CA}{\Delta Q^{(0)}} = 0$$

◆ P1. Se supone $Q^{(k)}$

◆ P2. Se determina $\frac{\Delta CA}{\Delta Q^{(k)}}$

◆ P3. Se determina $Q^{(k+1)}$

◆ P4. Si $|Q^{(k)} - Q^{(k+1)}| < \varepsilon \rightarrow \text{FIN}$

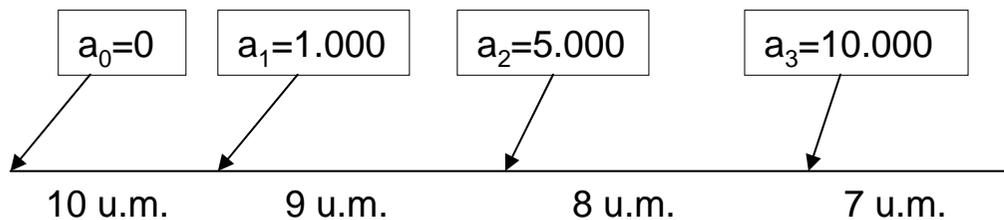
Si no $Q^{(k)} \rightarrow Q^{(k+1)}$

Se vuelve a P2

Rebajas uniformes

■ Situación:

Tramo 1:	de 0	a 1.000	10 u.m.
Tramo 2:	de 1.001	a 5.000	9 u.m.
Tramo 3:	de 5.001	a 10.000	8 u.m.
Tramo 4:	desde 10.000		7 u.m.



$$K_j(Q) = CL \cdot D / Q + CA_j \cdot D + i \cdot CA_j \cdot Q / 2$$

$$Q_j^0 = \sqrt{\frac{2 \cdot CL \cdot D}{i \cdot CA_j}}$$

■ Resolución

● Obtener lotes óptimos por tramo

$$\text{Si } a_j \leq Q_j^0 \leq a_{j+1} \Rightarrow Q_j^* = Q_j^0$$

Sino:

$$\text{Si } Q_j^0 < a_j \Rightarrow Q_j^* = a_j$$

$$\text{Si } Q_j^0 > a_{j+1} \Rightarrow Q_j^* = a_{j+1}$$

● Evaluar los costes por tramo

● Retener el tramo l tal que:

$$K_l^* = \min_j [K_j^*(Q_j^*)]$$

Múltiples artículos sujetos a una restricción

■ Problema:

$$[\text{MIN}] K = \sum_{j=1}^n K_j = \sum_{j=1}^n \left[CL_j \cdot \frac{D_j}{Q_j} + CA_j \cdot D_j + CS_j \frac{Q_j}{2} \right]$$

s.a.:

$$g(Q_1, Q_2, \dots, Q_j, \dots, Q_n) \leq R$$

■ Resolución:

◆ P1. Determinar

$$Q_j^0 = \sqrt{\frac{2 \cdot CL_j \cdot D_j}{CS_j}} \quad 1 \leq j \leq n$$

◆ P2. Determinar

$$g(Q_1^0, \dots, Q_j^0, \dots, Q_n^0)$$

(a) Si $g(Q_1^0, \dots, Q_j^0, \dots, Q_n^0) \leq R \Rightarrow Q_j^* = Q_j^0$; FIN

(b) Si $g(Q_1^0, \dots, Q_j^0, \dots, Q_n^0) > R \Rightarrow$ LAGRANGE

$$[\text{MIN}] L = \sum_{j=1}^n K_j + \lambda [g(Q_1, \dots, Q_j, \dots, Q_n) - R]$$

$$\text{MIN Resolver: } \begin{cases} \frac{\partial L}{\partial Q_j} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Sistema de ecuaciones} \\ [n+1] \end{array}$$

Ejemplo: restricciones en la cantidad inmovilizada media

■ Problema

$$[\text{MIN}] K = \sum_{j=1}^n K_j = \sum_{j=1}^n \left[CL_j \cdot \frac{D_j}{Q_j} + CA_j \cdot D_j + CS_j \cdot \frac{Q_j}{2} \right]$$

s.a.:

$$\frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n CA_j \cdot Q_j \leq I$$

■ Hipótesis

$$Q_j^0 = \sqrt{\frac{2 \cdot CL_j \cdot D_j}{CS_j}}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n CA_j \cdot Q_j^0 > I$$

■ Nuevo problema

$$[\text{MIN}] L = \sum_{j=1}^n \left[CL_j \cdot \frac{D_j}{Q_j} + CA_j \cdot D_j + CS_j \cdot \frac{Q_j}{2} \right] + \lambda \left[\frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n CA_j \cdot Q_j - I \right]$$

■ Procedimiento

$$\frac{\partial L}{\partial Q_j} = 0 \quad 1 \leq j \leq n; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

■ Solución

◆ Resolver:

$$\frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n CA_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot CL_j \cdot D_j}{CS_j + \lambda CA_j}} = I$$

$$g(\lambda) = I$$

Fabricación de varios tipos de piezas en una máquina

■ Vocabulario :

- ◆ j : índice de pieza (1,...n)
- ◆ D_j : Tasa de consumo (anual) para j .
- ◆ P_j : Tasa de producción (anual) para j .
- ◆ TP_j : Tiempo de preparación (máquina) para lote de j .

■ Hipótesis :

- ◆ No roturas; igual número de lanzamientos.

■ Problema :

$$[\text{MIN}] K(N) = \sum_{j=1}^n \left[CL_j \cdot N + CA_j \cdot D_j + CS_j \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{D_j}{N} \cdot \left(1 - \frac{D_j}{P_j} \right) \right] \quad [\text{r.0}]$$

$$\text{s.a: } \sum_{j=1}^n TP_j + \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{P_j} \cdot T \leq T; T = \frac{1}{N} \quad [\text{r.1}]$$

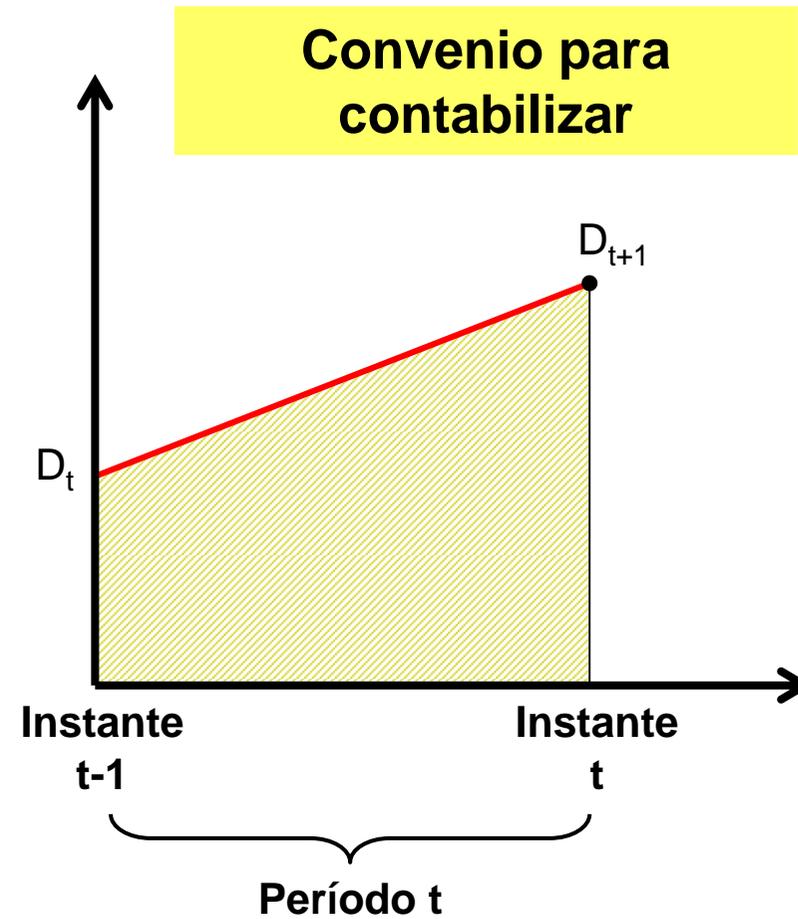
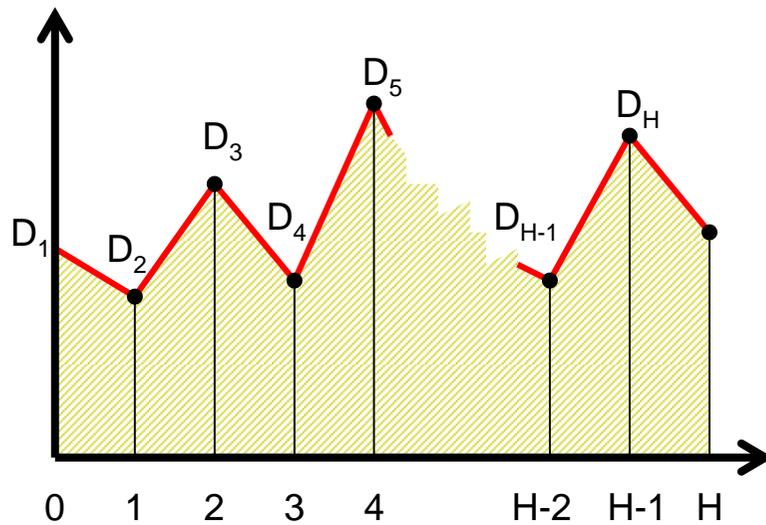
■ Solución :

$$\text{De [r.0]} \rightarrow N^0 = \sqrt{\frac{\sum_j CS_j \cdot D_j \cdot \left(1 - \frac{D_j}{P_j} \right)}{2 \cdot \sum_j CL_j}}$$

$$\text{De [r.1]} \rightarrow N \leq N_{\text{max}} = \frac{1 - \sum_j \frac{D_j}{P_j}}{\sum_j TP_j}$$

$$N^* = \min\{N^0, N_{\text{max}}\}$$

Demanda no homogénea



Base del algoritmo de Silver-Meal

$$K(1) = CL$$

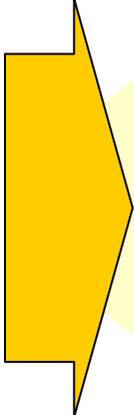
$$K(2) = (CL + CS \cdot D_2) / 2$$

$$K(3) = (CL + CS \cdot D_2 + 2 \cdot CS \cdot D_3) / 3$$

...

$$K(t) = (CL + CS \sum_{\tau=1}^t (\tau-1) \cdot D_{\tau}) / t$$

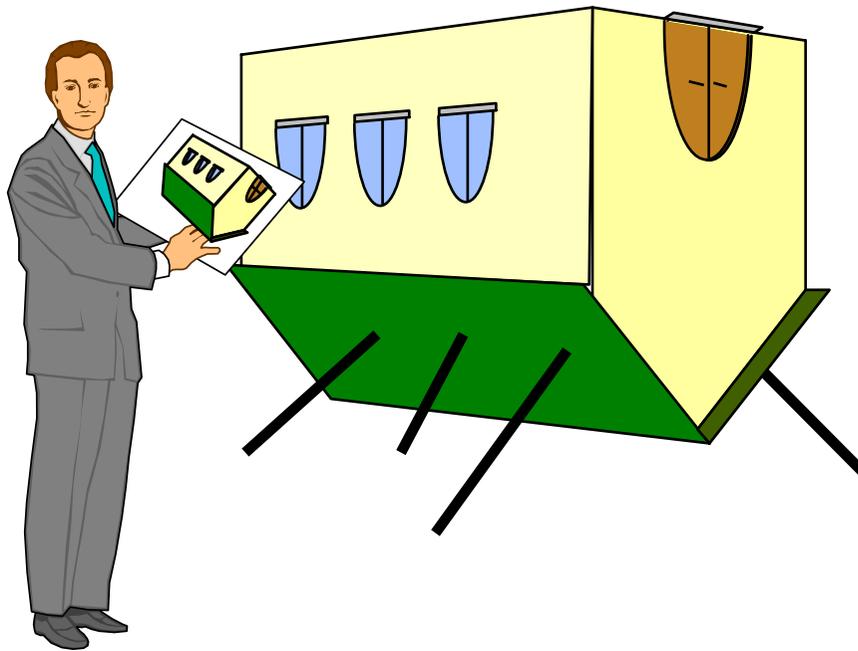
$$K(H) = (CL + CS \sum_{\tau=1}^H (\tau-1) \cdot D_{\tau}) / H$$



Determinar consecutivamente,
para t-creciente, el valor de K(t);
Parar en

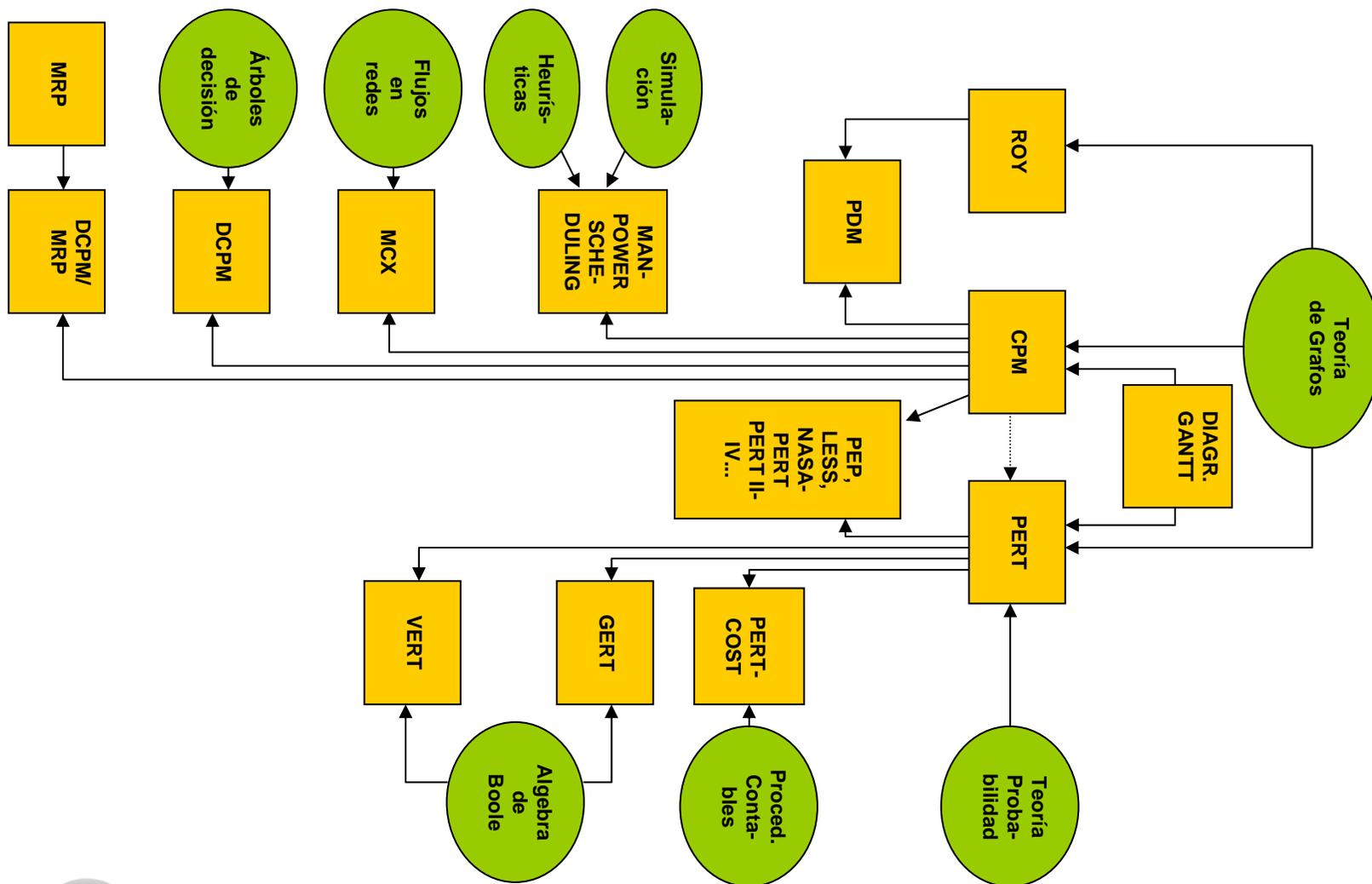
$$\hat{t} / K(\hat{t}+1) > K(\hat{t})$$

Gestión de proyectos



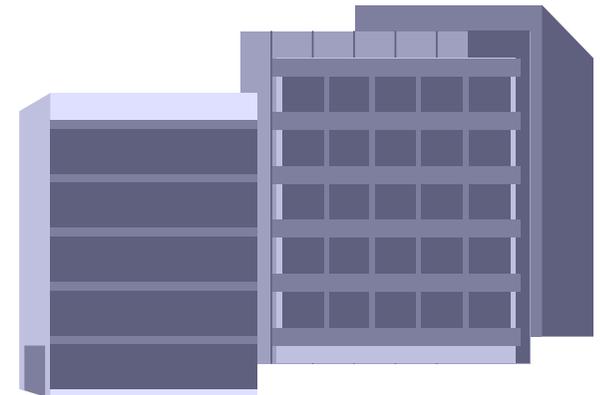
Departament
d'Organització
d'Empreses

Historia y genealogía



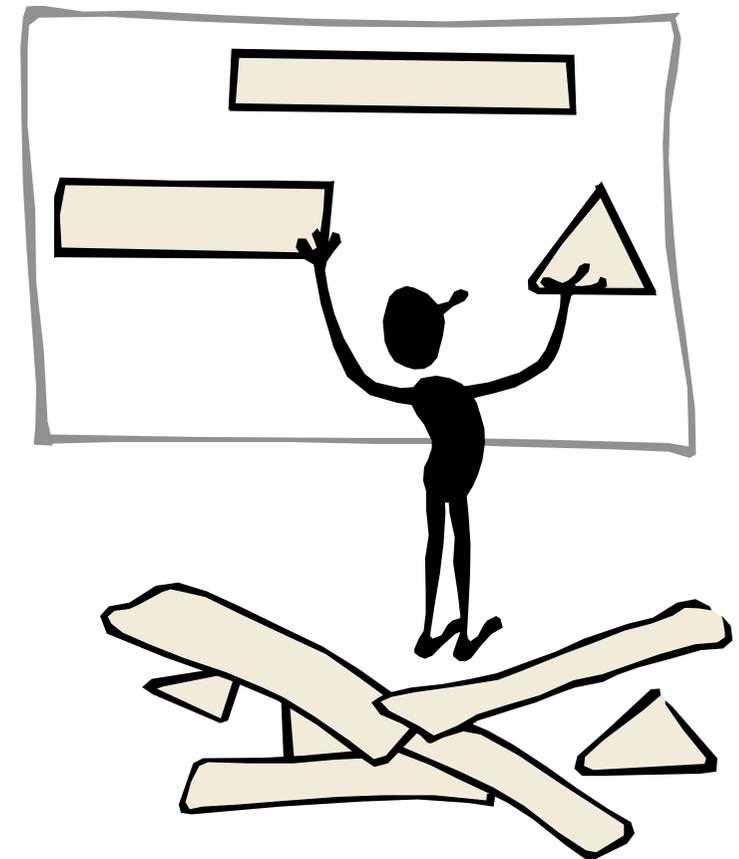
¿ Qué es un proyecto ?

- **La organización interna de las empresas está preparada para responder a las necesidades y actividades regulares de la misma.**
- **Existen unas actividades singulares, que llamaremos proyectos, para las cuales se precisa establecer una organización y procedimientos especiales.**
- **Ejemplos:**
 - ◆ **Construcción de una central térmica**
 - ◆ **Desarrollo de un nuevo producto**
 - ◆ **Automatización de una línea de producción**
 - ◆ **Construcción de una planta o un almacén**
 - ◆ **Traslado o modificación de un departamento**
 - ◆ **Reorganización de una empresa**
 - ◆ **Reajustes de plantilla**
 - ◆ **Realización de un estudio de reducción de costes**
 - ◆ **Informatización de procesos**
 - ◆ **Implantación de las normas de calidad ISO 9000**



Problemas de ordenación: características

- El objetivo es el estudio y/o control de la realización de un proyecto.
- El proyecto se descompone en actividades o tareas.
- Existen ligaduras o restricciones que condicionan la ejecución de las actividades.



Atributos de las actividades

■ Atributos de identificación:

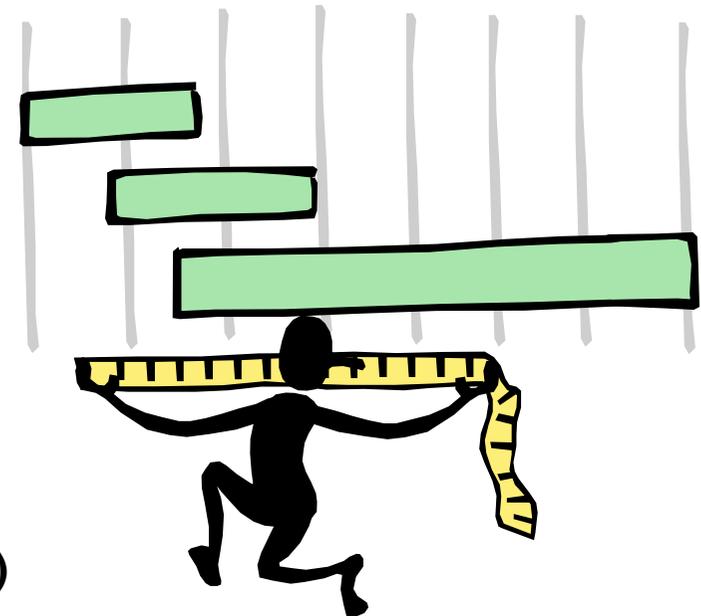
- ◆ Código
- ◆ Designación
- ◆ Tipo
- ◆ Ejecutor

■ Atributos temporales:

- ◆ Duración
- ◆ Fechas previstas de Inicio y Fin (Actualización)
- ◆ Fechas reales de Inicio y Fin

■ Atributos de requerimiento de recursos:

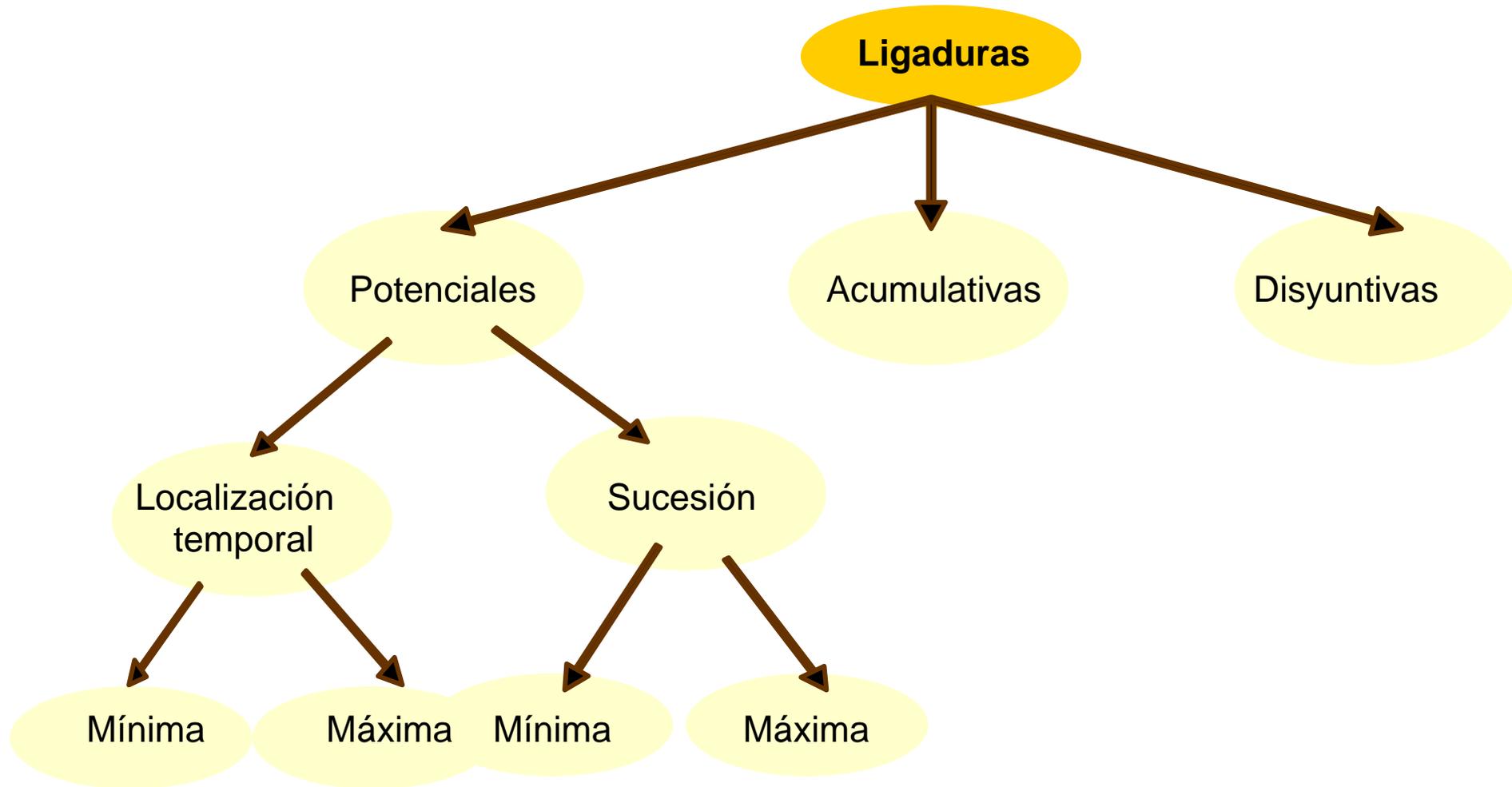
- ◆ Tipo de Recurso
- ◆ Cantidad



Causas de la existencia de restricciones o ligaduras

- **La tecnología**
- **La mano de obra**
- **El equipo**
- **Los aprovisionamientos**
- **Las ventas o aspectos comerciales o contractuales**
- **La climatología**

Clasificación de las ligaduras



Nomenclatura (ligaduras potenciales)

- t_i = fecha (instante) de comienzo de la actividad i
- t_j = fecha (instante) de comienzo de la actividad j
- f_i = fecha a partir de la cual puede comenzar i
- F_i = fecha antes de la cual debe comenzar i
- a = plazo mínimo que debe transcurrir entre el comienzo de i y el de j
- b = plazo máximo que puede transcurrir entre el comienzo de i y el de j

Ligaduras potenciales (formalización)

- Localización temporal mínima

$$t_i \geq f$$

- Localización temporal máxima

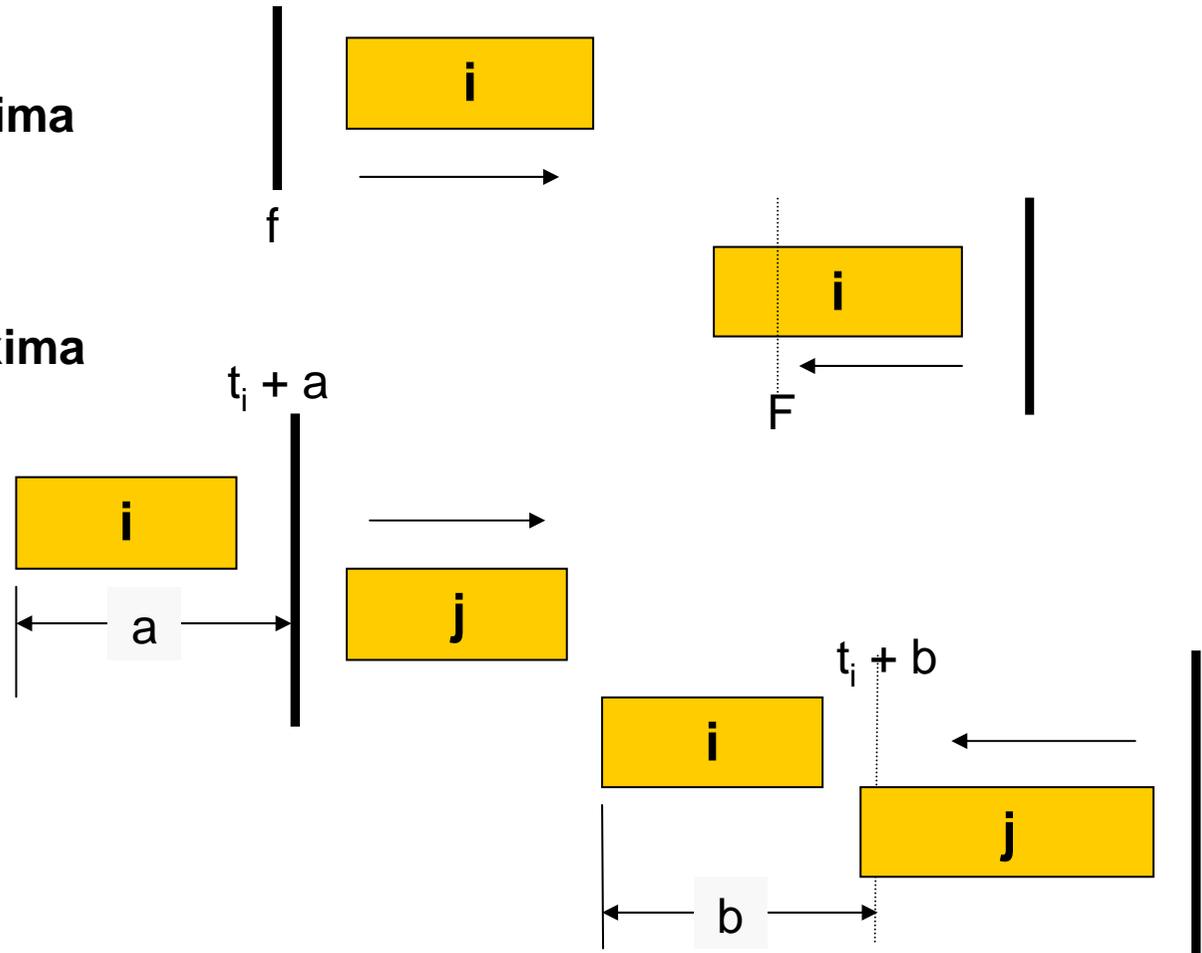
$$t_i \leq F$$

- Sucesión mínima

$$t_j \geq t_i + a$$

- Sucesión máxima

$$t_j \leq t_i + b$$



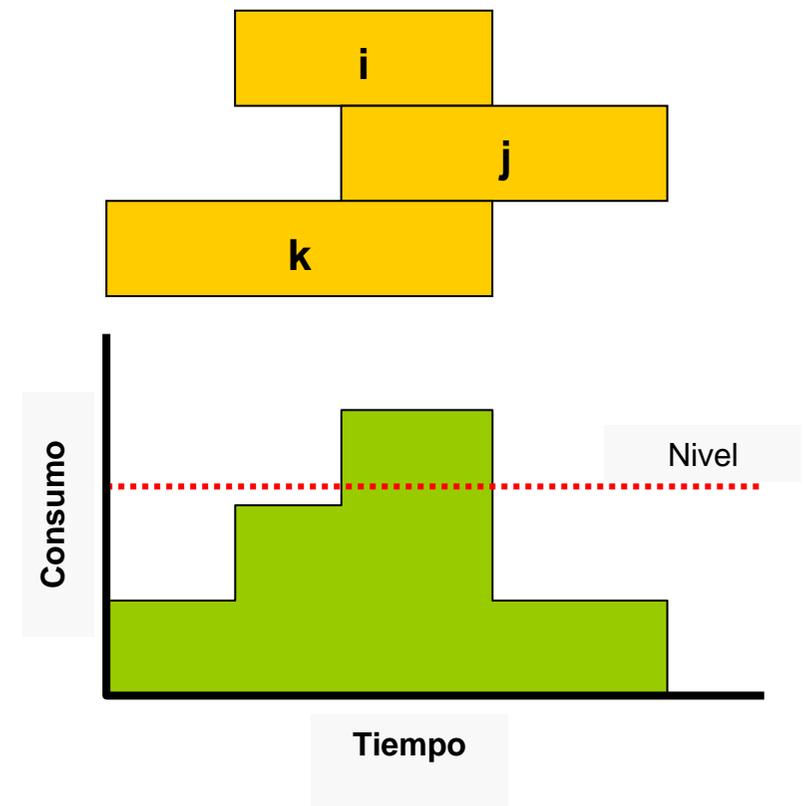
Ligaduras acumulativas (formalización)

■ Nomenclatura

- ◆ $G_k(\theta)$: cantidad disponible del recurso k en el instante θ
- ◆ $g_{ik}(\theta)$: cantidad empleada del recurso k por la actividad i en el instante θ

■ Formalización

$$\sum_i g_{ik}(\theta) \leq G_k(\theta)$$



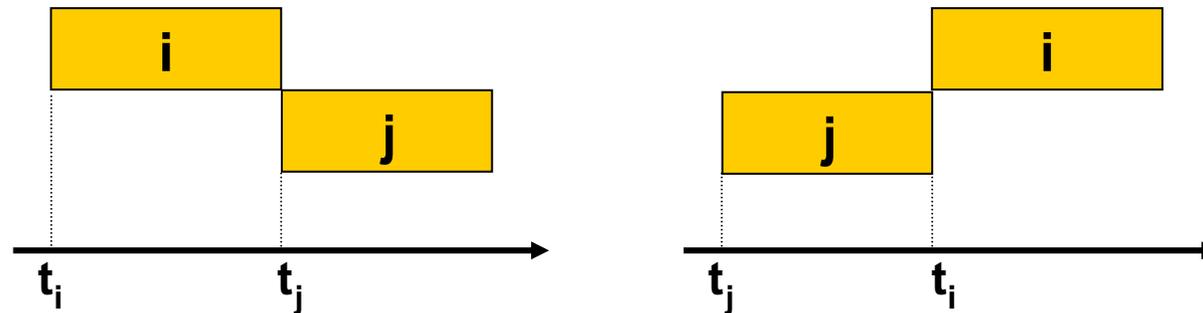
Ligaduras disyuntivas (formalización)

■ Nomenclatura

- ◆ d_i = duración de la actividad i
- ◆ d_j = duración de la actividad j

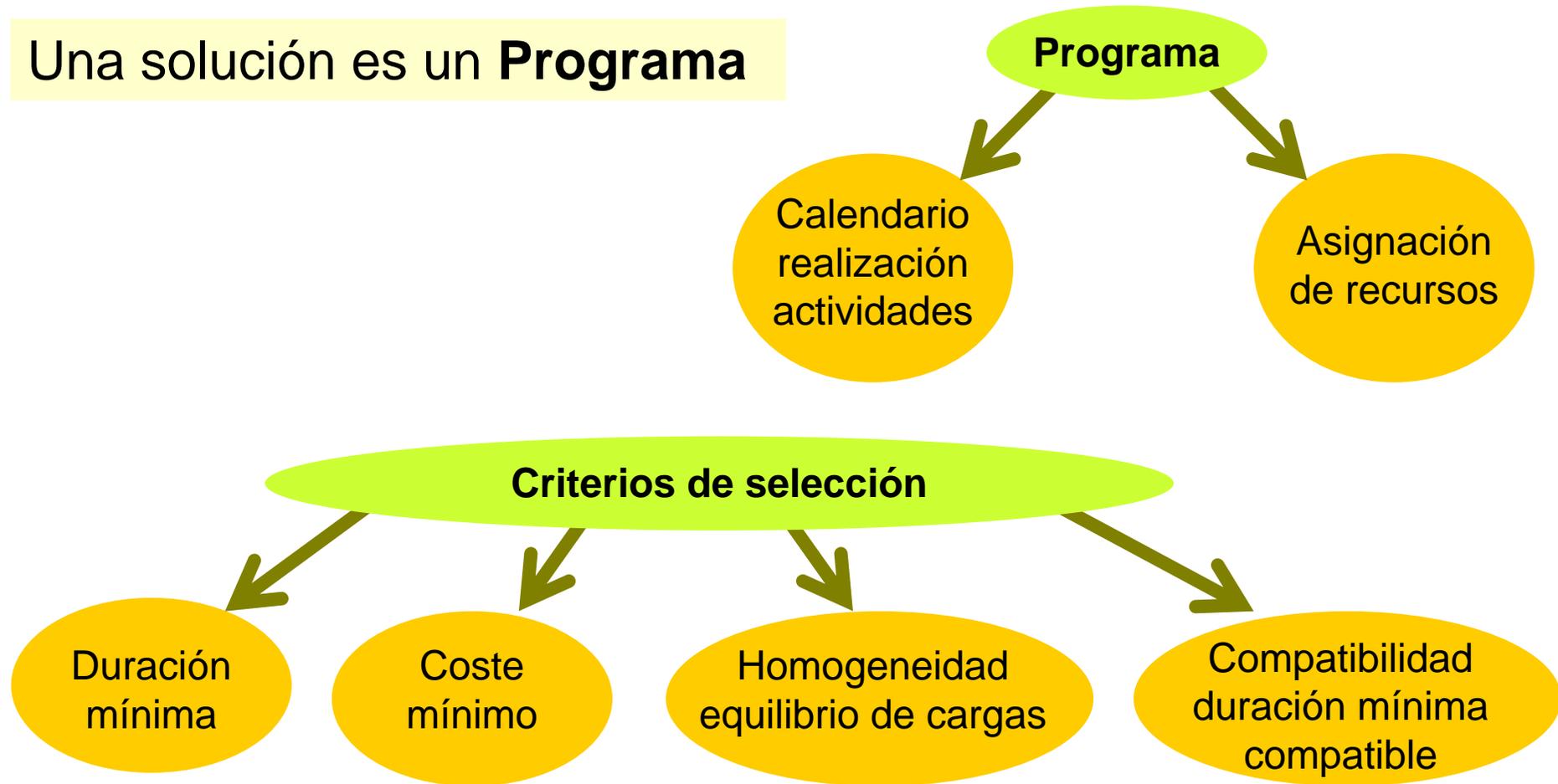
■ Formalización

$$t_j \geq t_i + d_i \quad \text{ó} \quad t_i \geq t_j + d_j$$

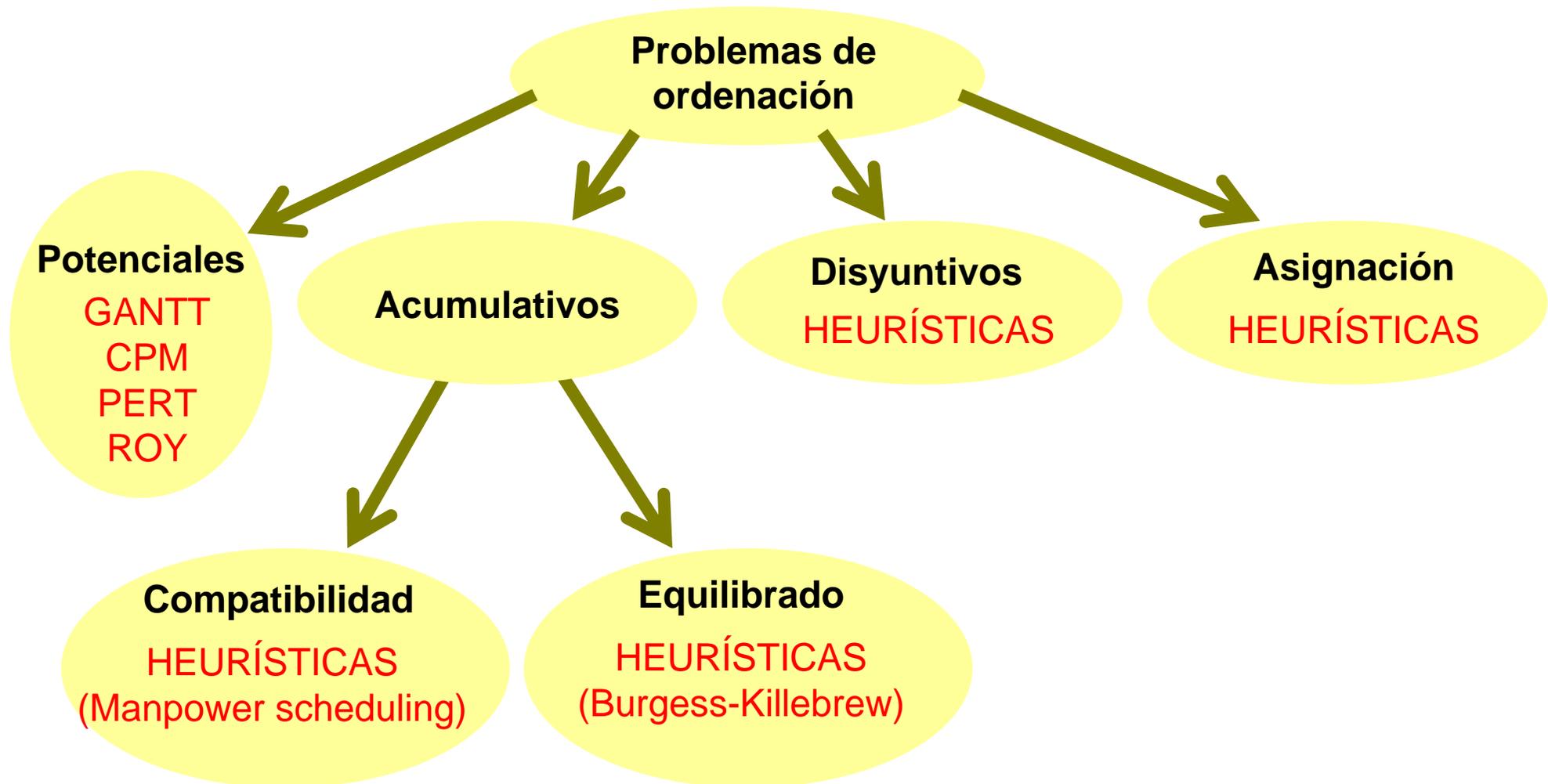


Soluciones

Una solución es un **Programa**



Clasificación y tratamiento de los problemas de ordenación



Datos de los problemas potenciales y acumulativos: lista de actividades

■ Datos cualitativos

- ◆ Código
- ◆ Descripción

■ Datos cuantitativos

- ◆ Duración
- ◆ Unidades de cada tipo de recurso
- ◆ Pagos
- ◆ Actividades precedentes inmediatas

Ejemplo introductorio: proyecto OBRA (1/3)

Nº	COD.	DESCRIPCIÓN	Dur.	Preced.
1	A	DESPEJAR EMPLAZAMIENTO	4	-
2	B	MEDICIÓN Y REPLANTEO	3	A
3	C	EXPLANACIÓN	2	B
4	D	PRE. ACOMETIDA ELÉCTRICA	7	C
5	E	EXC. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	2	C
6	F	EXC. DESAGÜES	10	C
7	G	CIMENTOS DEPÓSITO AGUA	5	C
8	H	PERFORACIÓN POZO	15	C
9	I	INS. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	5	E
10	J	INS. TUBERÍAS DESAGÜES	6	F
11	K	CONSTRUCCIÓN DEPÓSITO AGUA	10	G
12	L	INS. BOMBA	2	H
13	M	INS. ESTACIÓN TRANSFORMADORA	3	I, J
14	N	INS. TUBERÍAS (V.) DEPÓSITO	9	K
15	P	INS. CONDUCCIONES SUBTERRÁNEAS	8	L
16	Q	CONEXIÓN RED GENERAL	5	D, M
17	R	CONEXIÓN TUBERÍAS	2	N, P

Ejemplo introductorio: proyecto OBRA (2/3)

Nº	COD.	DESCRIPCIÓN	Dur.	Siguiente
1	A	DESPEJAR EMPLAZAMIENTO	4	B
2	B	MEDICIÓN Y REPLANTEO	3	C
3	C	EXPLANACIÓN	2	D,E,G,H,F
4	D	PRE. ACOMETIDA ELÉCTRICA	7	Q
5	E	EXC. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	2	I
6	F	EXC. DESAGÜES	10	J
7	G	CIMENTOS DEPÓSITO AGUA	5	K
8	H	PERFORACIÓN POZO	15	L
9	I	INS. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	5	M
10	J	INS. TUBERÍAS DESAGÜES	6	M
11	K	CONSTRUCCIÓN DEPÓSITO AGUA	10	N
12	L	INS. BOMBA	2	P
13	M	INS. ESTACIÓN TRANSFORMADORA	3	Q
14	N	INS. TUBERÍAS (V.) DEPÓSITO	9	R
15	P	INS. CONDUCCIONES SUBTERRÁNEAS	8	R
16	Q	CONEXIÓN RED GENERAL	5	-
17	R	CONEXIÓN TUBERÍAS	2	-

Ejemplo introductorio: proyecto OBRA (3/3)

Nº	COD.	DESCRIPCIÓN	RA	RB	CI	CF	CC
1	A	DESPEJAR EMPLAZAMIENTO	1	1	10	-	-
2	B	MEDICIÓN Y REPLANTEO	2	3	-	-	1
3	C	EXPLANACIÓN	4	-	-	-	2
4	D	PRE. ACOMETIDA ELÉCTRICA	2	4	5	-	1
5	E	EXC. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	1	1	-	-	1
6	F	EXC. DESAGÜES	2	4	10	-	2
7	G	CIMENTOS DEPÓSITO AGUA	1	3	-	10	-
8	H	PERFORACIÓN POZO	1	2	-	20	-
9	I	INS. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	2	4	2	-	2
10	J	INS. TUBERÍAS DESAGÜES	1	7	-	15	-
11	K	CONSTRUCCIÓN DEPÓSITO AGUA	3	7	-	25	-
12	L	INS. BOMBA	1	1	4	1	-
13	M	INS. ESTACIÓN TRANSFORMADORA	2	8	4	15	-
14	N	INS. TUBERÍAS (V.) DEPÓSITO	2	4	4	-	2
15	P	INS. CONDUCCIONES SUBTERRÁNEAS	1	8	-	20	-
16	Q	CONEXIÓN RED GENERAL	1	4	-	10	-
17	R	CONEXIÓN TUBERÍAS	2	2	5	-	-

Diagrama Roy del proyecto Obra

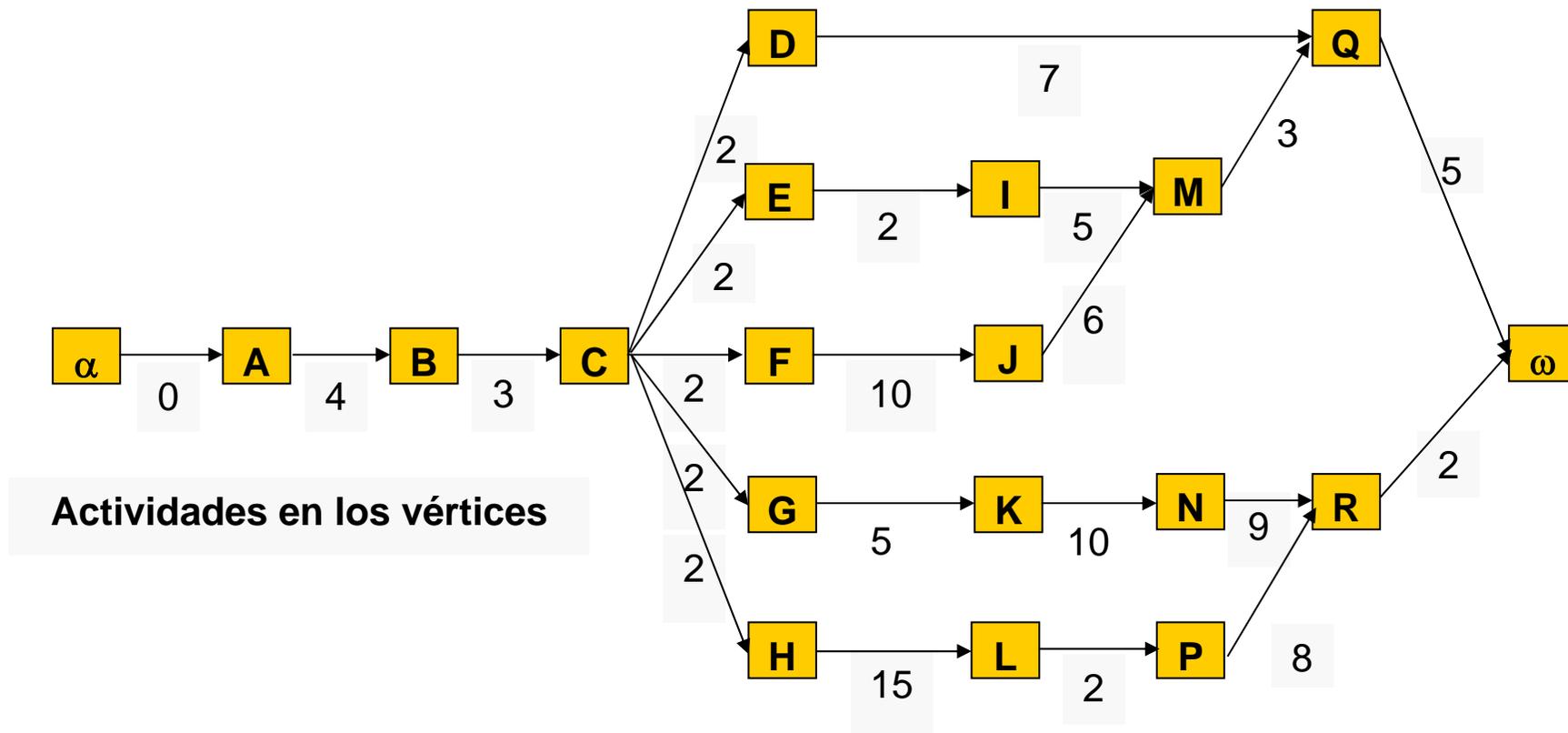
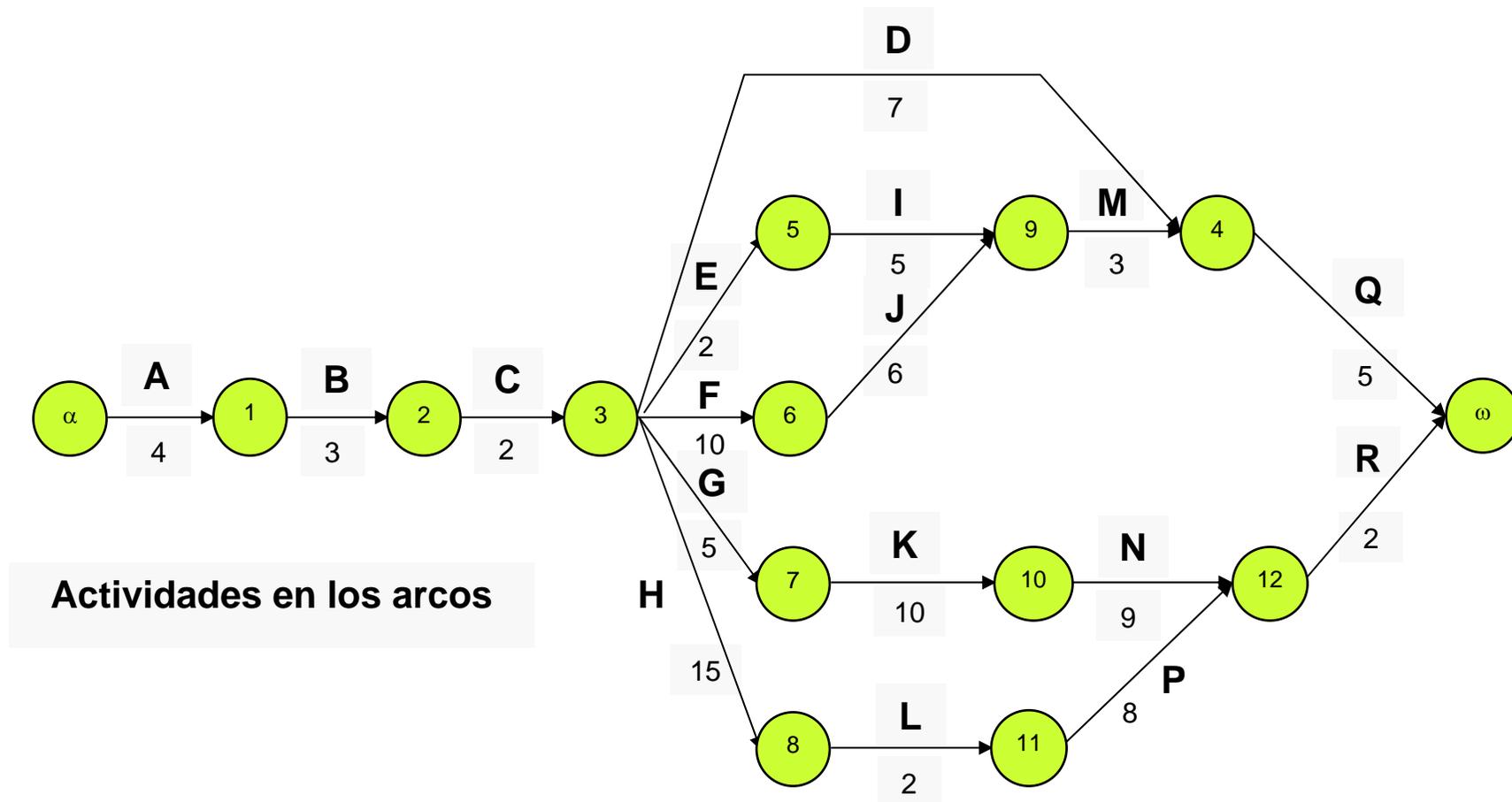


Diagrama PERT del proyecto Obra



Resultados de los problemas potenciales

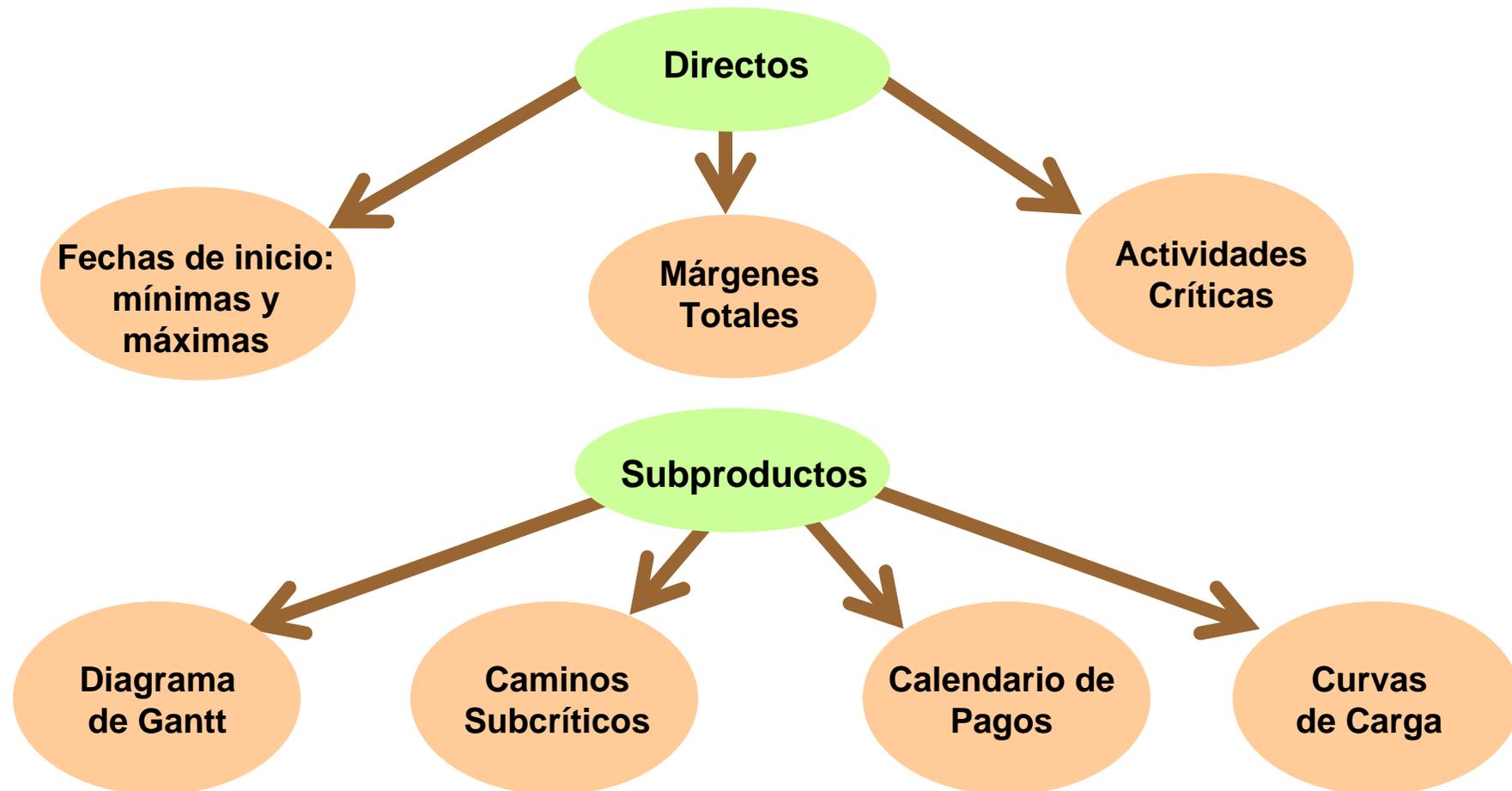
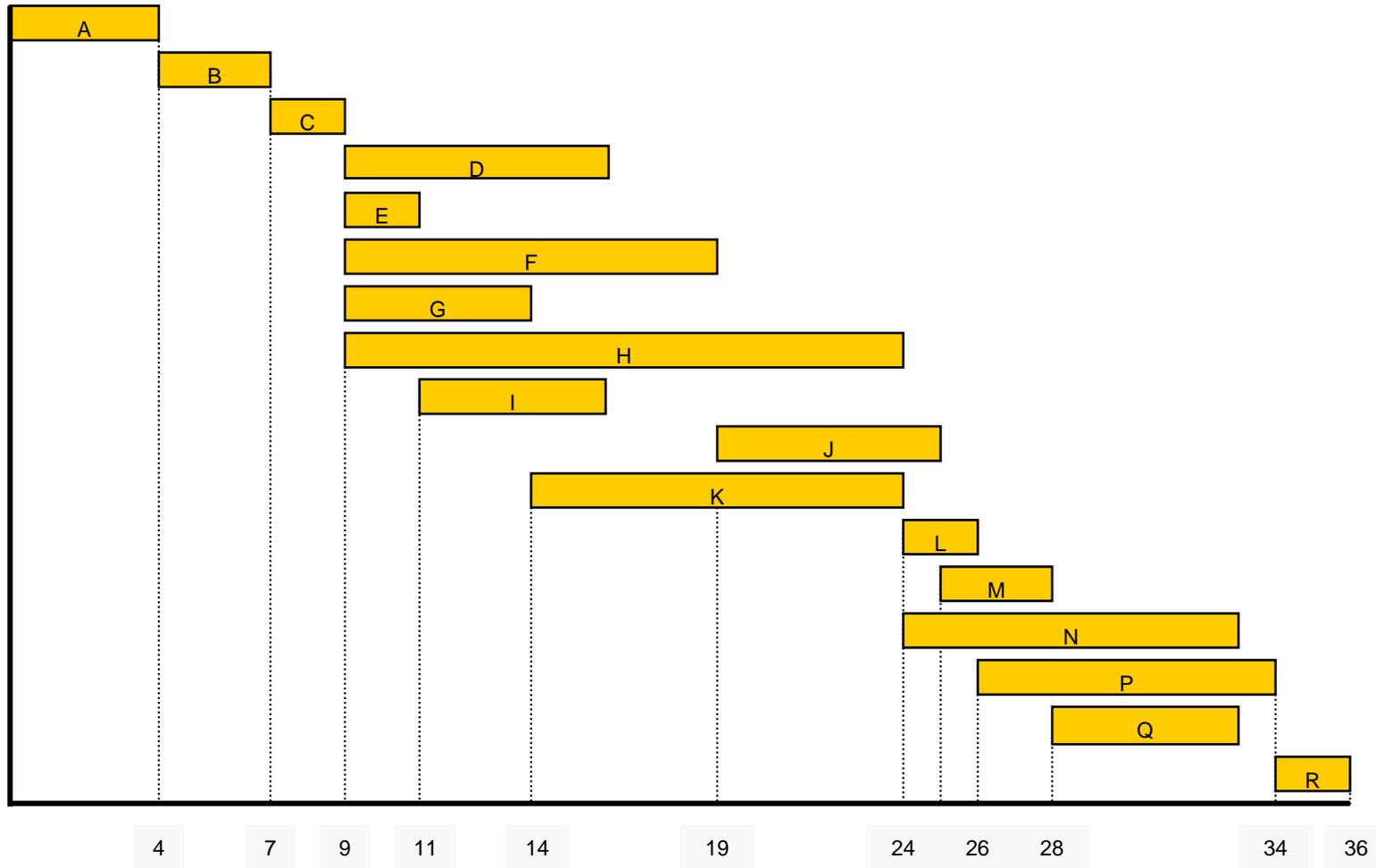
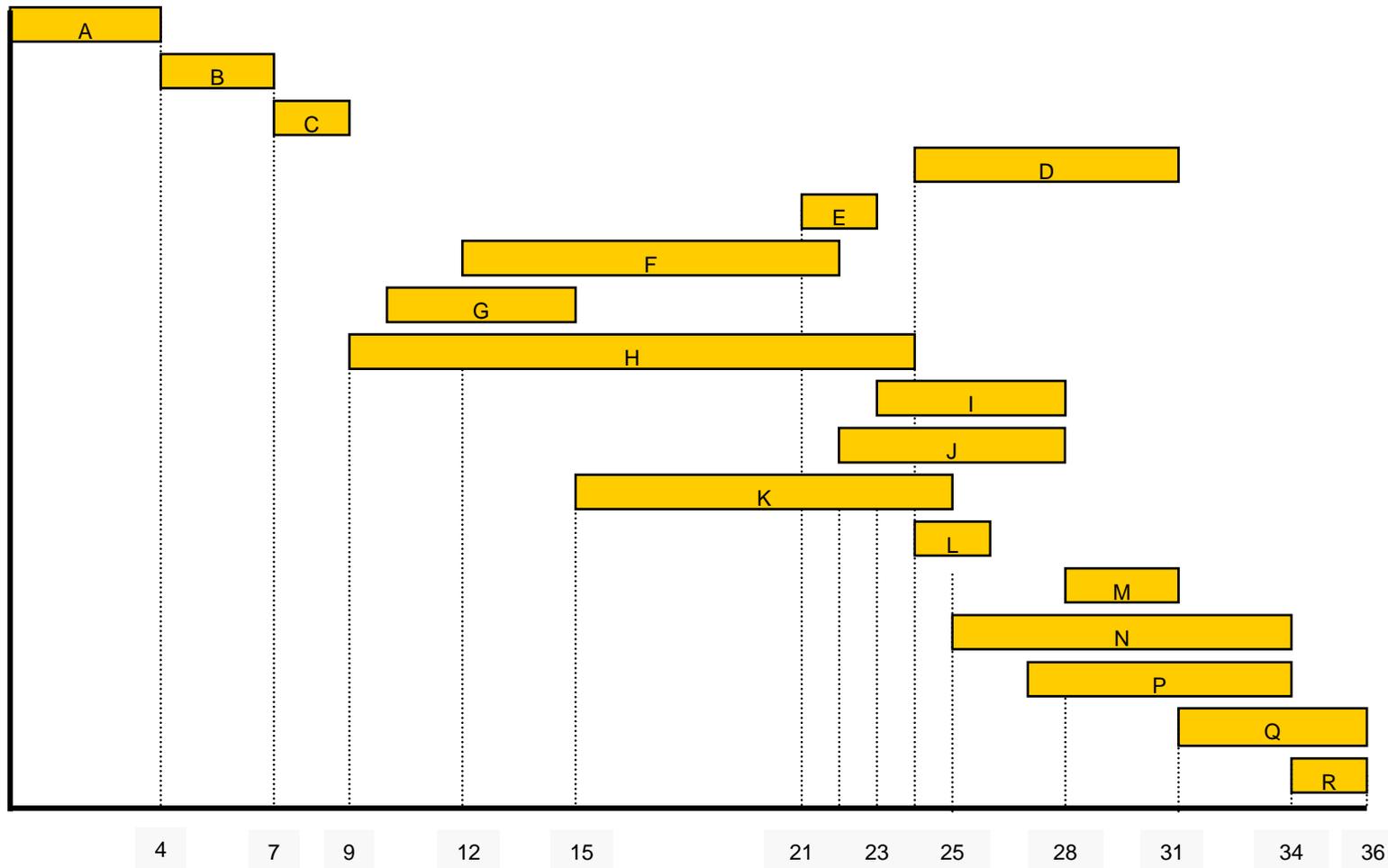


Diagrama de Gantt: fechas mínimas



Act.	Dur.	t
A	4	0
B	3	4
C	2	7
D	7	9
E	2	9
F	10	9
G	5	9
H	15	9
I	5	11
J	6	19
K	10	14
L	2	24
M	3	25
N	9	24
P	8	26
Q	5	28
R	2	34

Diagrama de Gantt: fechas máximas



Act.	Dur.	T
A	4	0
B	3	4
C	2	7
D	7	24
E	2	21
F	10	12
G	5	10
H	15	9
I	5	23
J	6	22
K	10	15
L	2	24
M	3	28
N	9	25
P	8	26
Q	5	31
R	2	34

Diagrama Roy: fechas mínimas y máximas

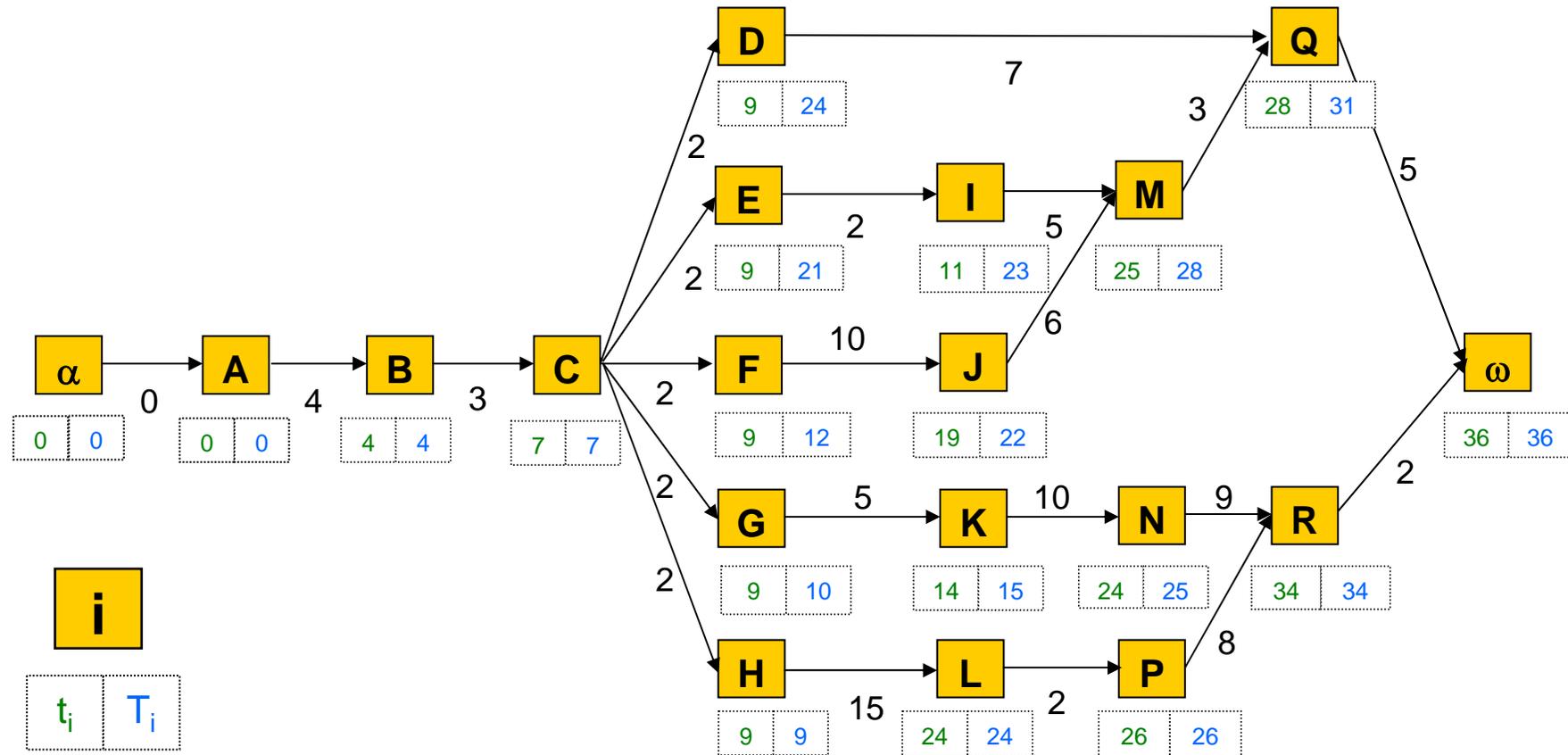


Diagrama PERT: fechas mínimas y máximas

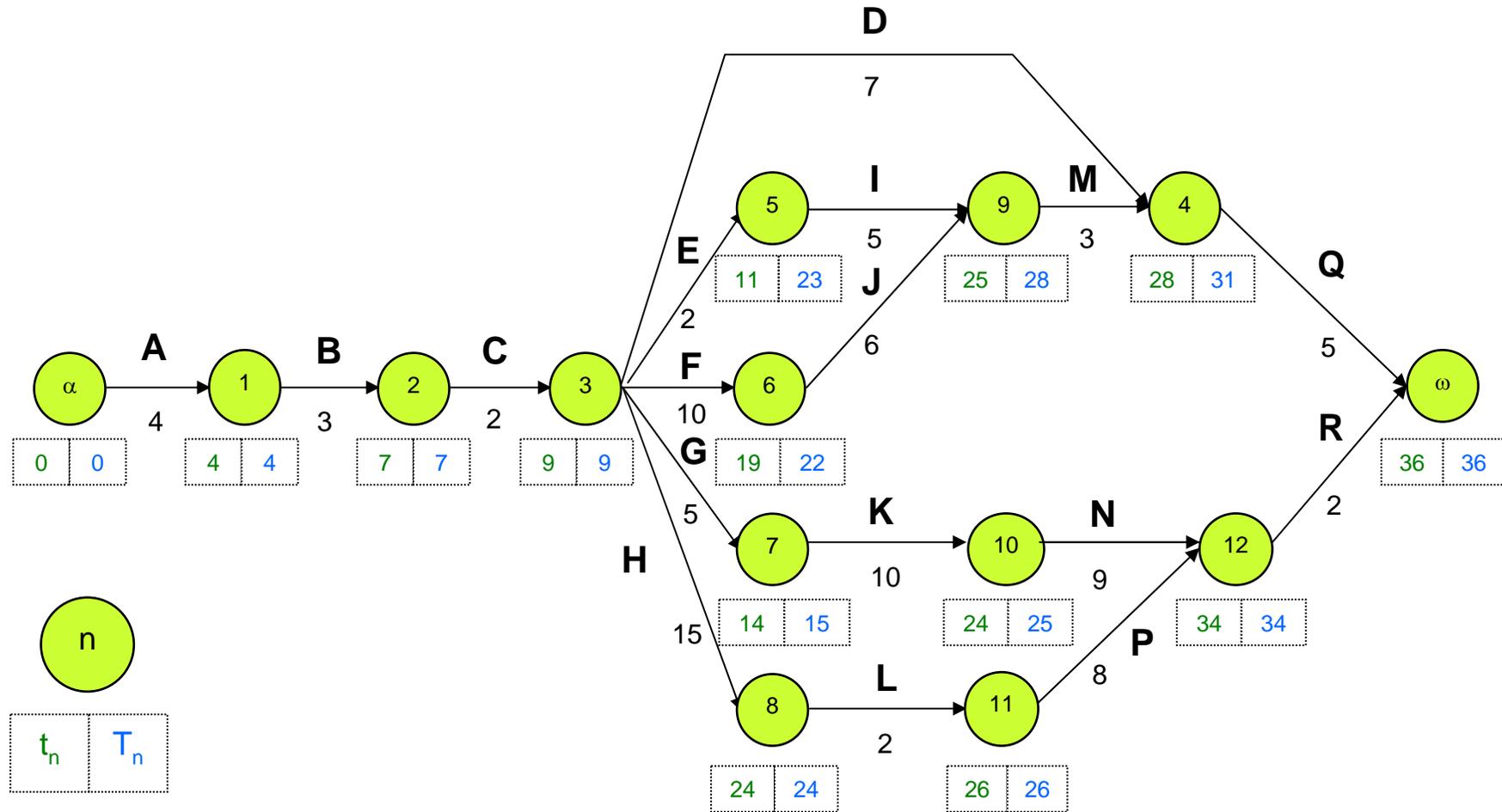


Diagrama Roy: camino crítico

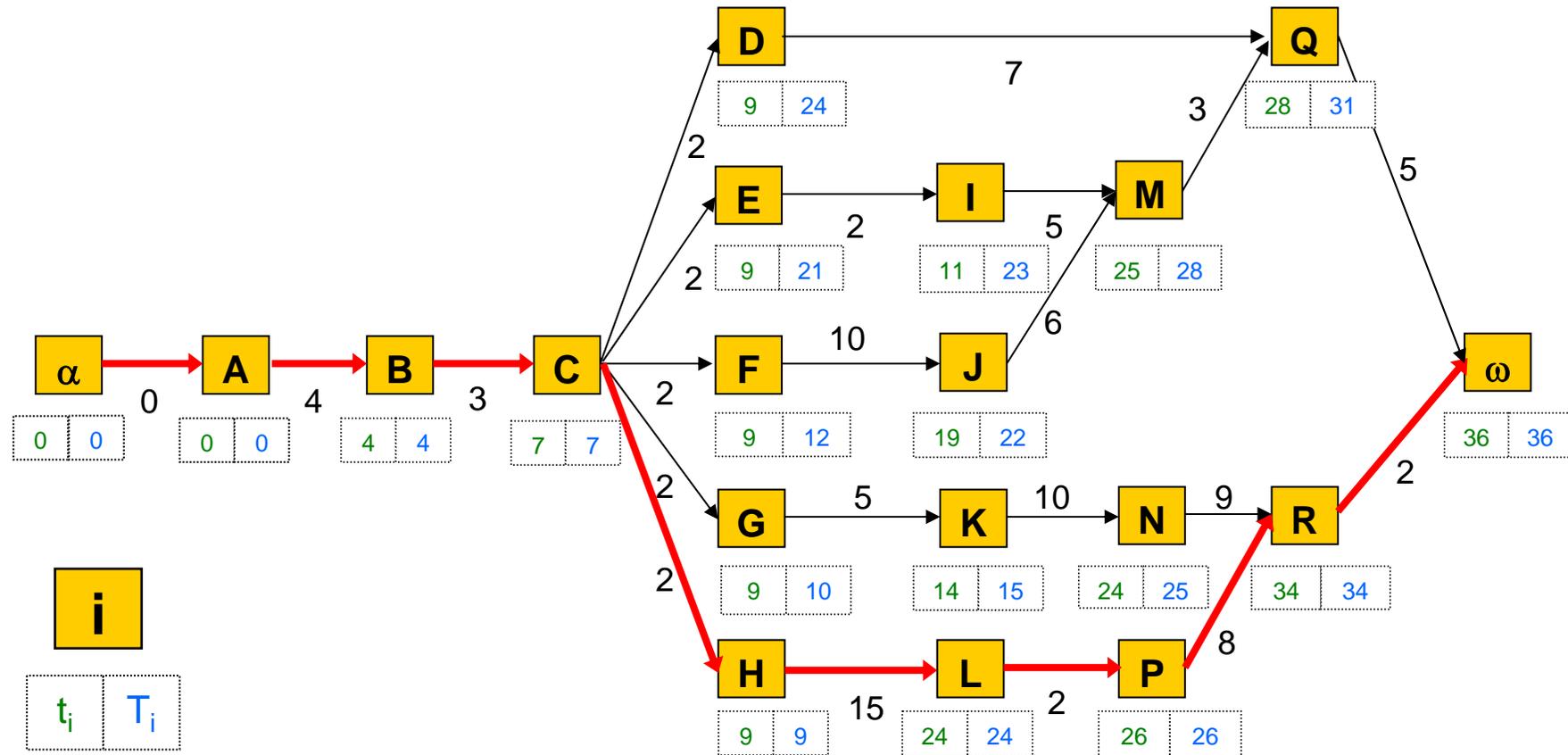
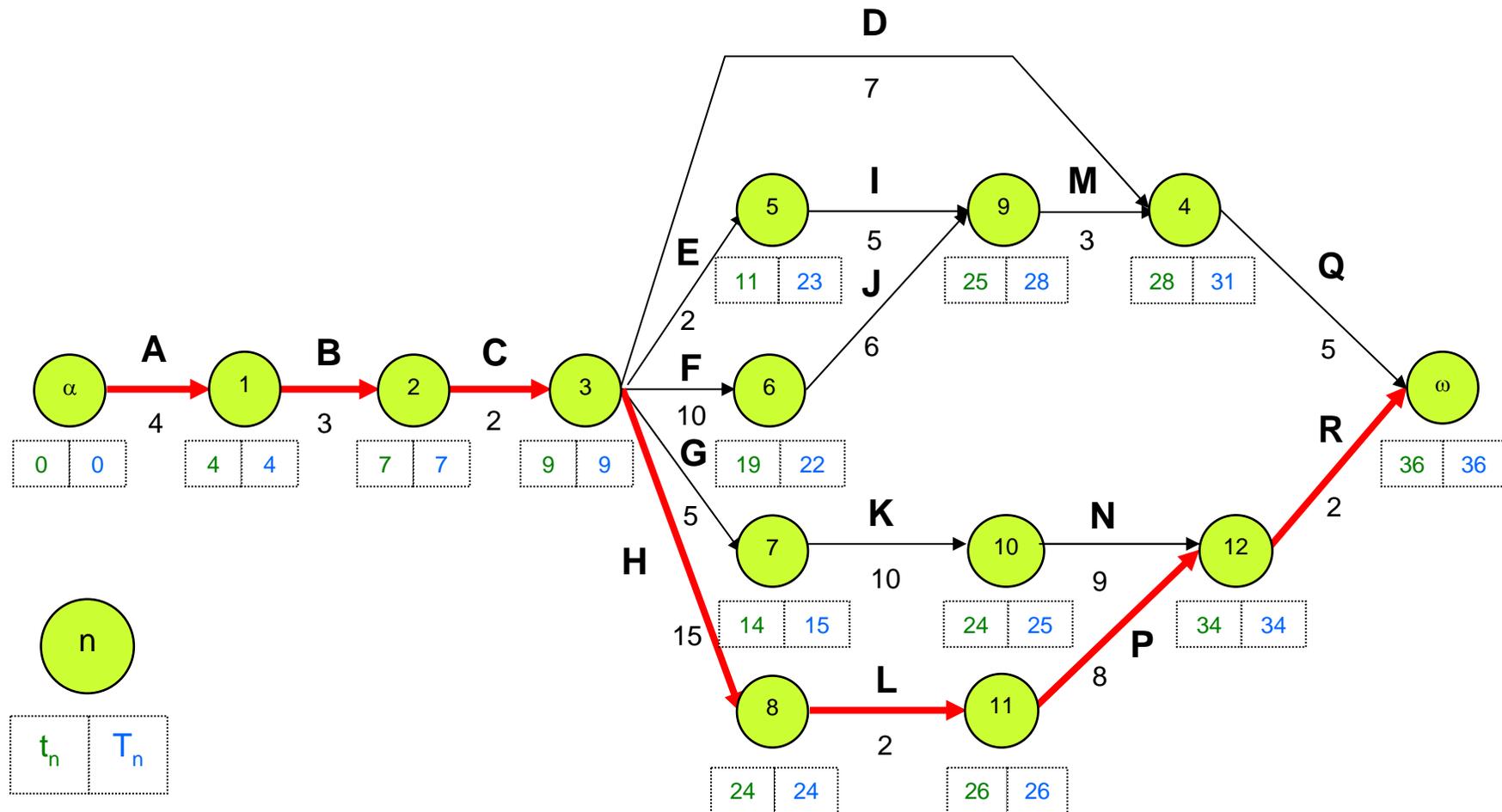


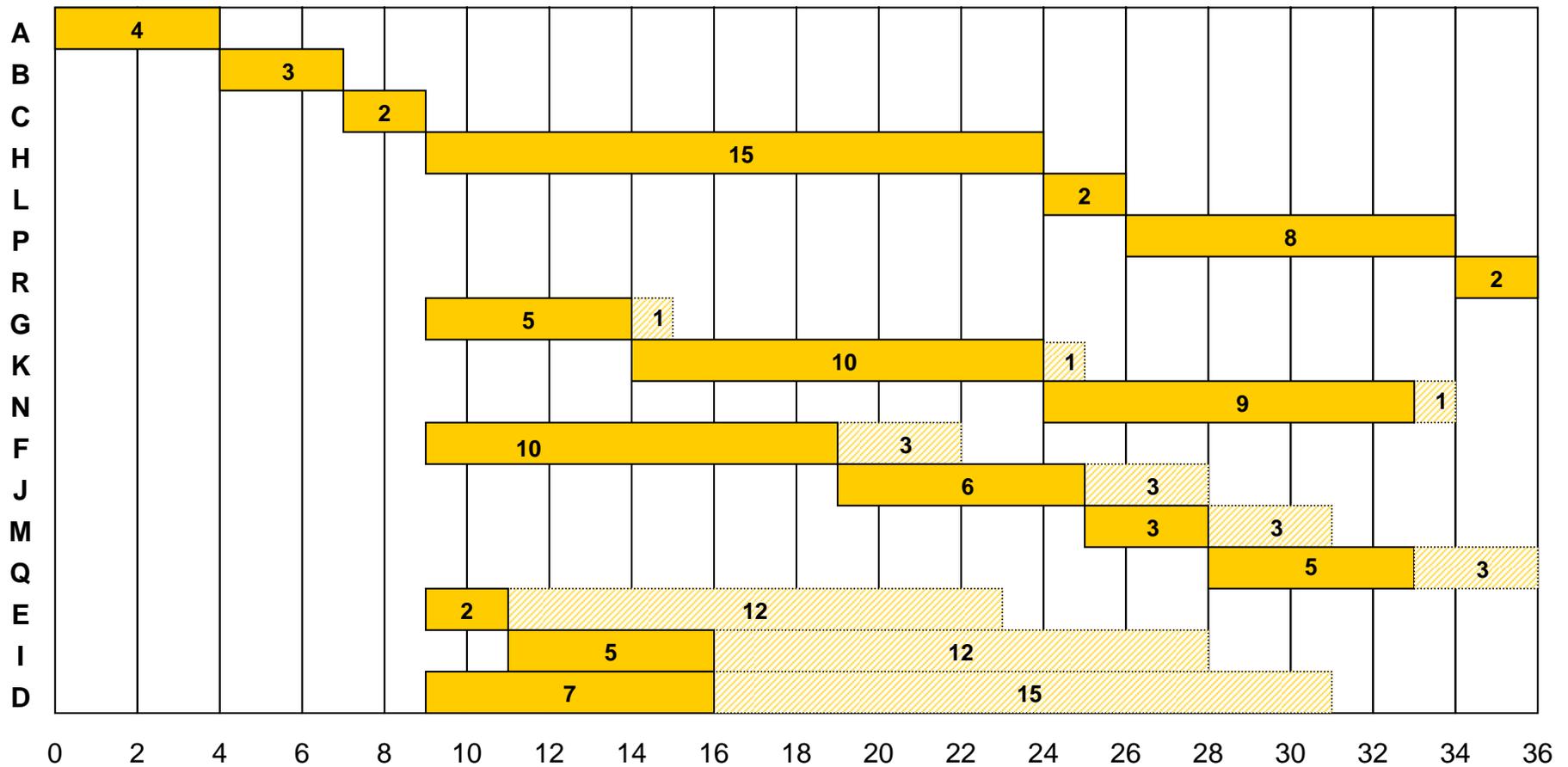
Diagrama PERT: camino crítico



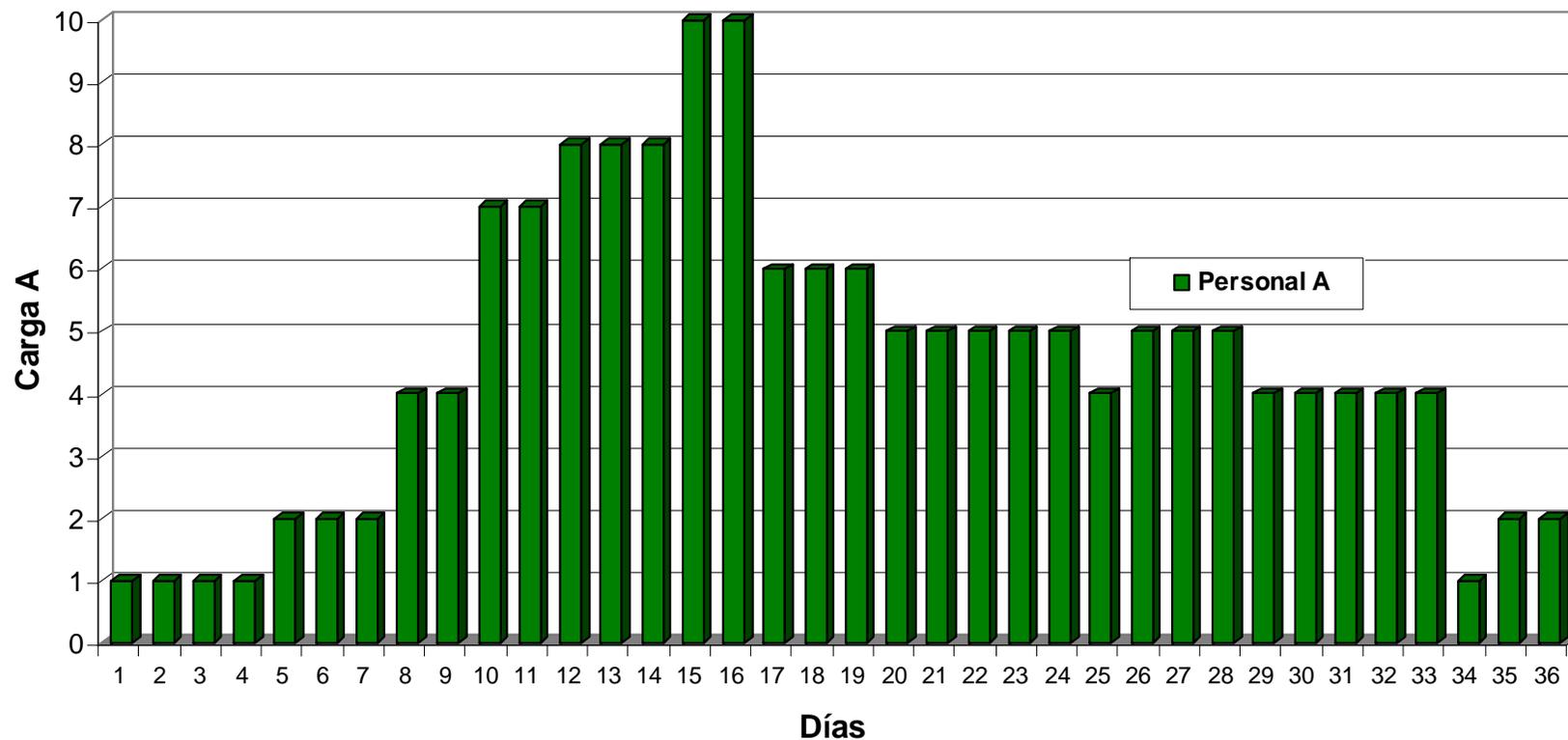
Resultados proyecto OBRA

Nº	COD.	DESCRIPCIÓN	Di	fi	Fi	mi	Crit.?
1	A	DESPEJAR EMPLAZAMIENTO	4	0	0	0	C
2	B	MEDICIÓN Y REPLANTEO	3	4	4	0	C
3	C	EXPLANACIÓN	2	7	7	0	C
4	D	PRE. ACOMETIDA ELÉCTRICA	7	9	24	15	-
5	E	EXC. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	2	9	21	12	-
6	F	EXC. DESAGÜES	10	9	12	3	-
7	G	CIMIENTOS DEPÓSITO AGUA	5	9	10	1	-
8	H	PERFORACIÓN POZO	15	9	9	0	C
9	I	INS. CONDUCCIONES ELÉCTRICAS	5	11	23	12	-
10	J	INS. TUBERÍAS DESAGÜES	6	19	22	3	-
11	K	CONSTRUCCIÓN DEPÓSITO AGUA	10	14	15	1	-
12	L	INS. BOMBA	2	24	24	0	C
13	M	INS. ESTACIÓN TRANSFORMADORA	3	25	28	3	-
14	N	INS. TUBERÍAS (V.) DEPÓSITO	9	24	25	1	-
15	P	INS. CONDUCCIONES SUBTERRÁNEAS	8	26	26	0	C
16	Q	CONEXIÓN RED GENERAL	5	28	31	3	-
17	R	CONEXIÓN TUBERÍAS	2	34	34	0	C

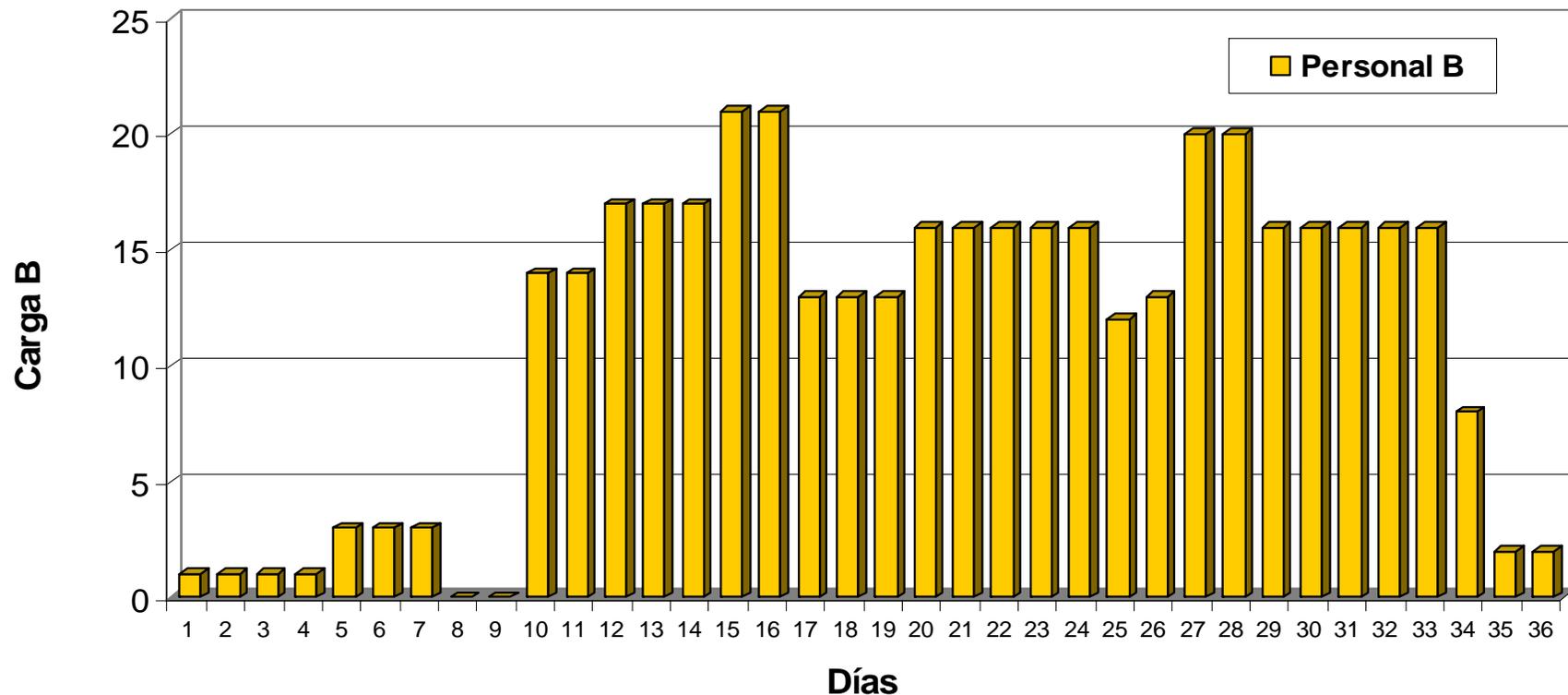
Caminos: diagrama de Gantt



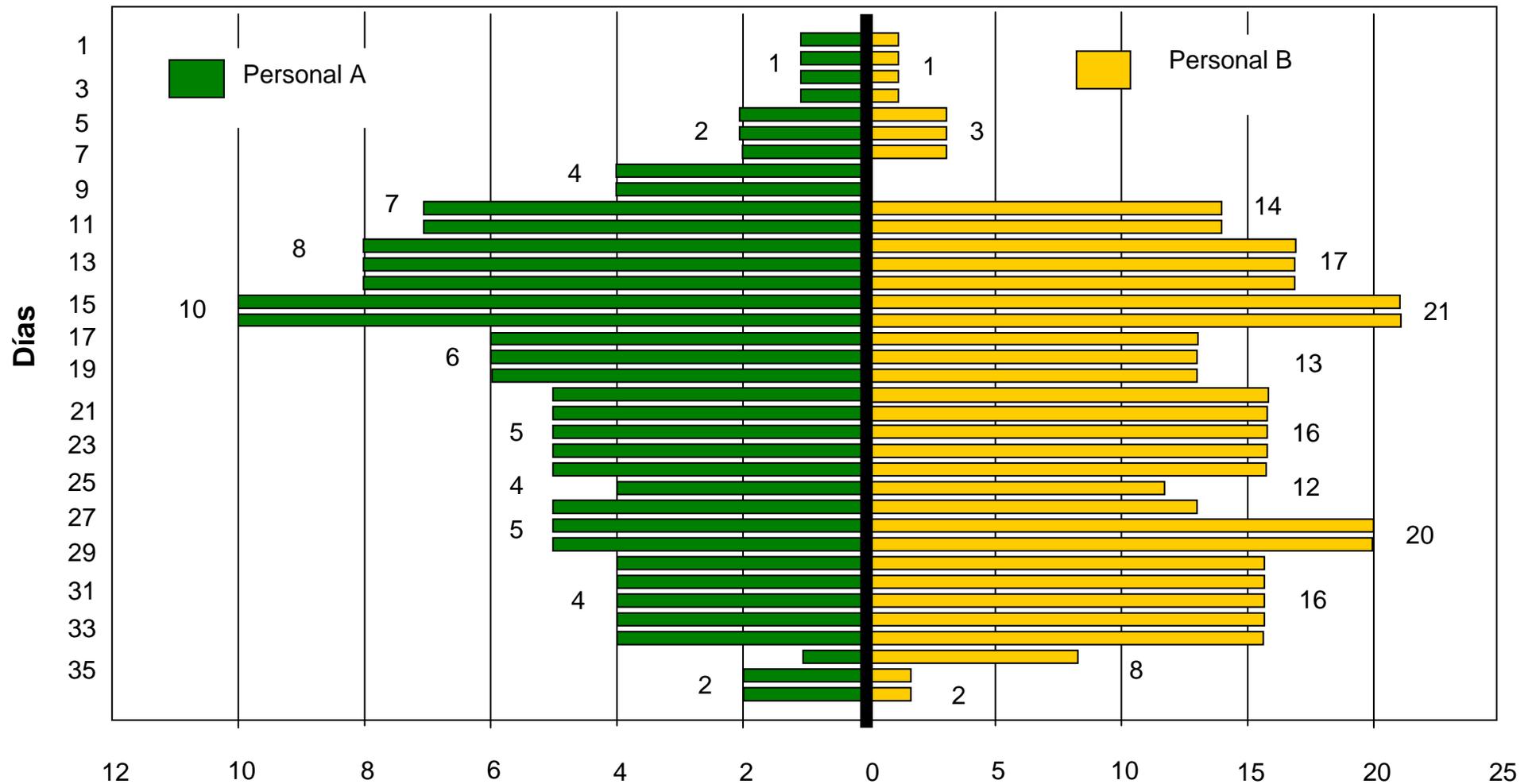
Resultados proyecto obra: curva de carga del recurso A



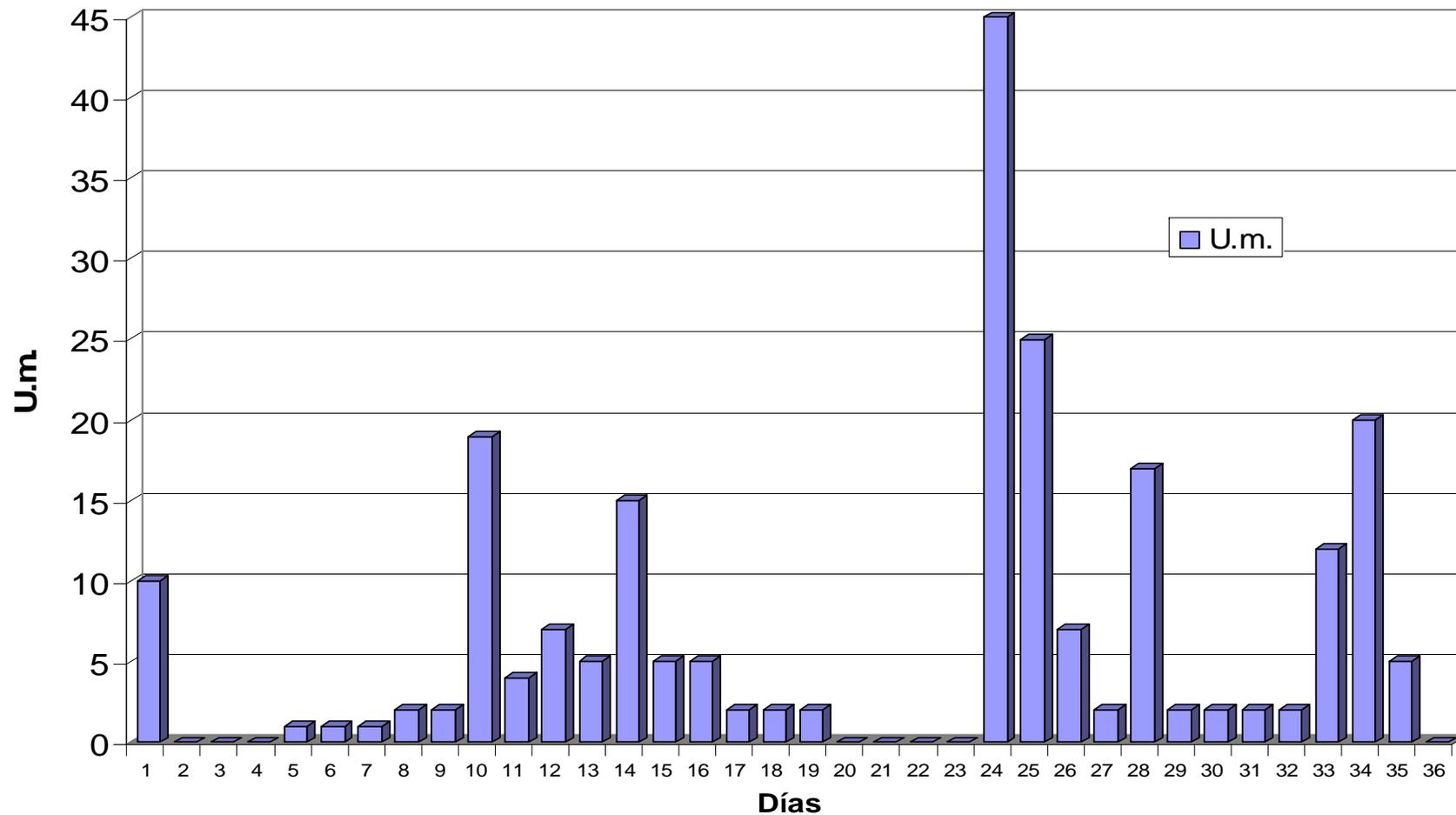
Resultados proyecto obra: curva de carga del recurso B



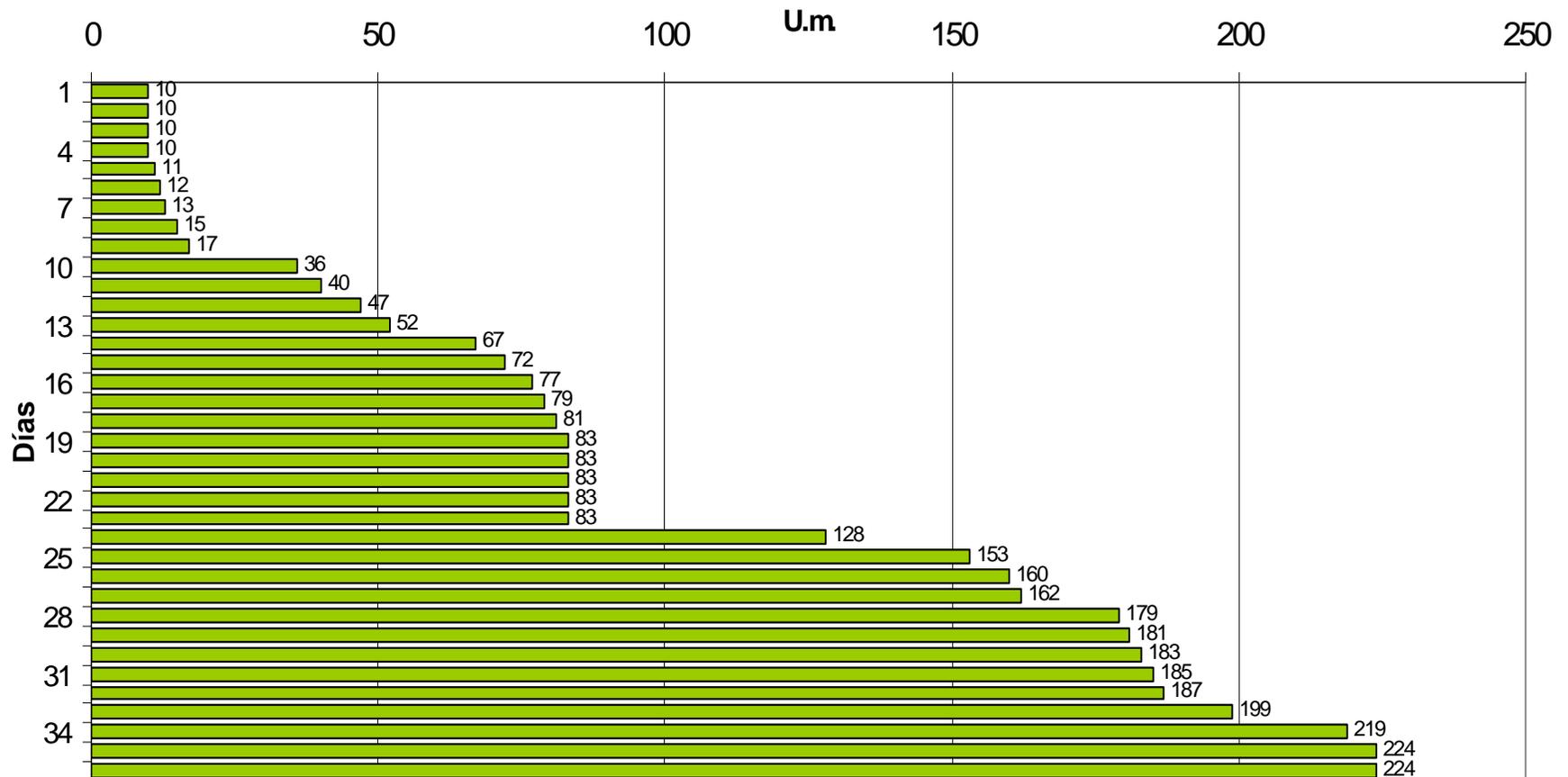
Resultados proyecto obra: curvas de carga comparadas



Resultados proyecto obra: calendario de pagos

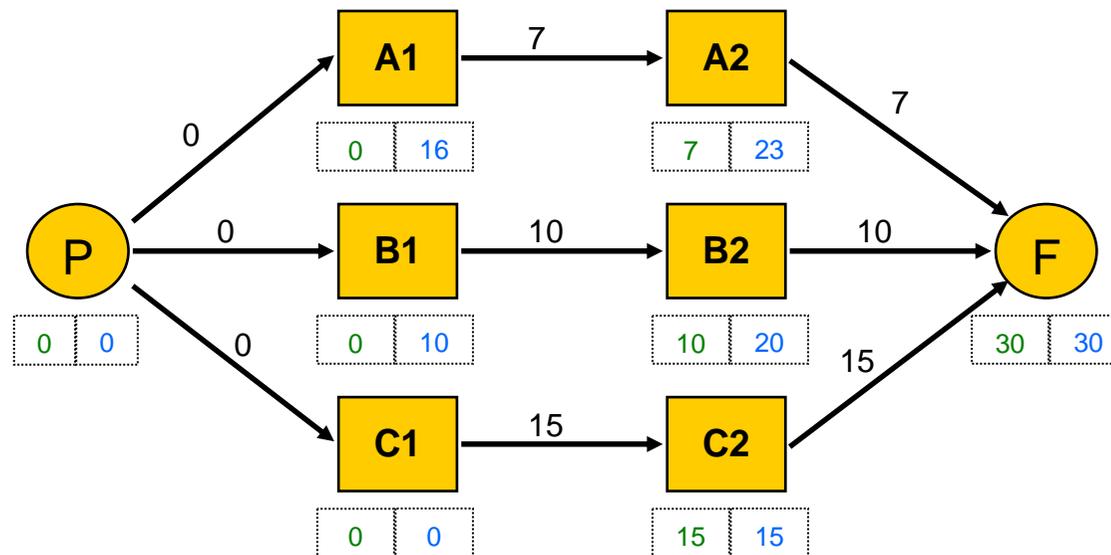


Resultados proyecto obra: pagos acumulados



Ejemplo de aplicación. Problemas acumulativos

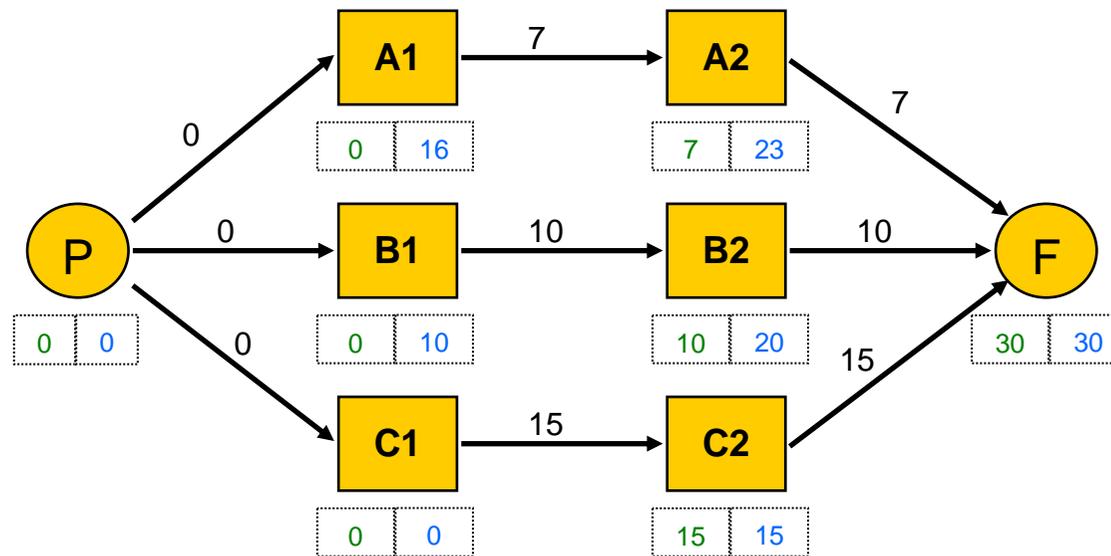
Se desea pulir por ambas caras tres discos de diferente tamaño, disponiéndose sólo de dos máquinas pulidoras idénticas para hacerlo. Las duraciones de las operaciones son 7, 10 y 15 u.t. (pulido de una cara de cada uno de los discos).



Determinación de cotas

- **Una cota inferior es una aproximación (por defecto) de la mejor solución que puede obtenerse para un problema.**
- **Para determinar una cota debe resolverse de forma exacta un problema que descarte una parte de la complejidad del problema:**
 - ◆ **Tener en cuenta las relaciones de precedencia pero no los recursos.**
Fecha mínima de finalización del proyecto según las ligaduras potenciales
 - ◆ **Tener en cuenta un recurso pero no las relaciones de precedencia u otros recursos.**
Unidades de tiempo necesarias para realizar todas las operaciones dividido entre las unidades de recurso disponibles

Determinación de Cotas



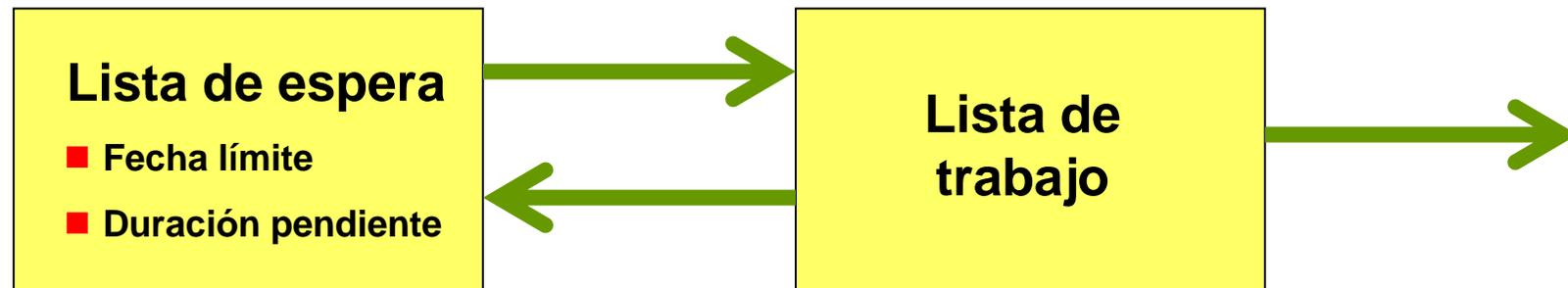
Cota:
- Ligaduras potenciales = 30
- Recurso pulidora = 32

La duración del proyecto será igual o superior a 32 unidades de tiempo

Obtención de soluciones

- **El objetivo final no es encontrar una cota de la solución sino una solución (fecha de finalización del proyecto e instantes de inicio y finalización de las actividades).**
- **Debido a la dificultad del problema, no existen procedimientos capaces de obtener la solución óptima de cualquier instancia. Por ello se opta por el desarrollo de heurísticas para resolver el problema:**
 - ◆ **Manpower Scheduling (simulación).**
 - ◆ **Burguess Killebrew (mejora).**
 - ◆ **Procedimientos greedy (constructivo).**

Algoritmo *Manpower Scheduling* (esquema)



■ De lista de espera a lista de trabajo:

- ◆ Han acabado las precedentes
- ◆ Hay recursos disponibles

■ De lista de trabajo a lista de espera (si se admite interrupción):

- ◆ Una actividad crítica de la lista de espera puede hacer pasar a una o más actividades no críticas de la lista de trabajo a la lista de espera

Algoritmo *Manpower Scheduling* (I)

■ ***Paso 0 (inicialización)***: Considerando únicamente las ligaduras potenciales establecer las fechas mínimas y máximas de las actividades. Construir la **lista de actividades** en las que estas se ordenan por fecha mínima creciente, en caso de empate por fecha máxima creciente y de persistir el empate en duración decreciente. Poner el **reloj** a cero (fecha de inicio del proyecto).

■ ***Paso 1 (lista de espera)***: Pasar las actividades cuya fecha mínima no supera la del reloj de la lista de actividades a la **lista de espera** (las actividades pasadas se eliminan de la lista de actividades). El orden en la lista de espera es por **fecha crítica** creciente, y en caso de empate, por **duración pendiente** creciente.

Inicialmente, para las actividades provenientes de la lista de actividades, la fecha crítica es igual a la fecha máxima y la duración pendiente igual a la duración.

Algoritmo *Manpower Scheduling* (II)

- **Paso 2 (lista de trabajo):** Decidir la ejecución de actividades pasándolas de la lista de espera a la lista de trabajo de la siguiente forma:

- **Paso 2.1 (actividades críticas):** Si existen recursos libres suficientes, lanzar la ejecución de las actividades críticas, es decir, aquellas que en la lista de espera tienen la fecha crítica igual a la del reloj, pasándolas a la lista de trabajo con los valores de fecha crítica y duración pendiente que tenían en la lista de espera.

El procedimiento de ordenación en la lista de trabajo es el mismo que en la lista de espera.

Dotar cada actividad de la lista de trabajo con la fecha prevista de terminación igual a la fecha del reloj más la duración pendiente. Reducir el almacén de recursos libres en las cantidades de los utilizados por las actividades. Ir al paso 2.4; en caso contrario, no hay recursos suficientes, ir al paso 2.2.

Algoritmo *Manpower Scheduling* (III)

- **Paso 2.2 (interrupción de actividades):** Interrumpir actividades no críticas de la lista de trabajo pasándolas de nuevo a la lista de espera devolviendo sus recursos al almacén de recursos libres; el orden de la interrupción es por fecha crítica decreciente, y en caso de empate, por duración pendiente decreciente. Inscribir en la lista de espera la fecha crítica y la duración pendiente que había en la lista de trabajo. Cesar en las interrupciones cuando se dispone de suficientes recursos libres o no existen más actividades no críticas que se puedan interrumpir. Si se han obtenido suficientes recursos, volver a **2.1**; en caso contrario, ir a **2.3**.

- **Paso 2.3 (retraso del proyecto):** El proyecto debe aumentar su duración. Borrar las listas de trabajo y de espera, reconstruir la lista de actividades aumentando las fechas máximas en una unidad respecto a las anteriores. Poner el reloj a cero e ir al **paso 1**.

Algoritmo *Manpower Scheduling* (IV)

- **Paso 2.4 (actividades no críticas):** Lanzar la ejecución de actividades no críticas si ello es posible; una actividad candidata debe ser tal que sus precedentes han alcanzado el grado de ejecución requerido por las ligaduras potenciales y no consume más recursos que los disponibles en el almacén. En caso de varias candidatas, elegir en primer lugar la más crítica (menor fecha crítica).

Pasar las actividades lanzadas a la lista de trabajo con su fecha crítica y duración pendiente en la lista de espera, determinar la fecha prevista de terminación y detraer los recursos que consumen del almacén de recursos. Cesar el lanzamiento de actividades no críticas cuando no existen más candidatas.

- **Paso 3 (avance del reloj):** Aumentar la fecha del reloj. Dado que los acontecimientos significativos que influyen en la simulación son el paso de actividades de la lista de actividades a la de espera, de la lista de espera a la de trabajo y la eliminación de las actividades terminadas de la lista de trabajo, se considerará como nueva fecha del reloj la menor de las siguientes fechas:

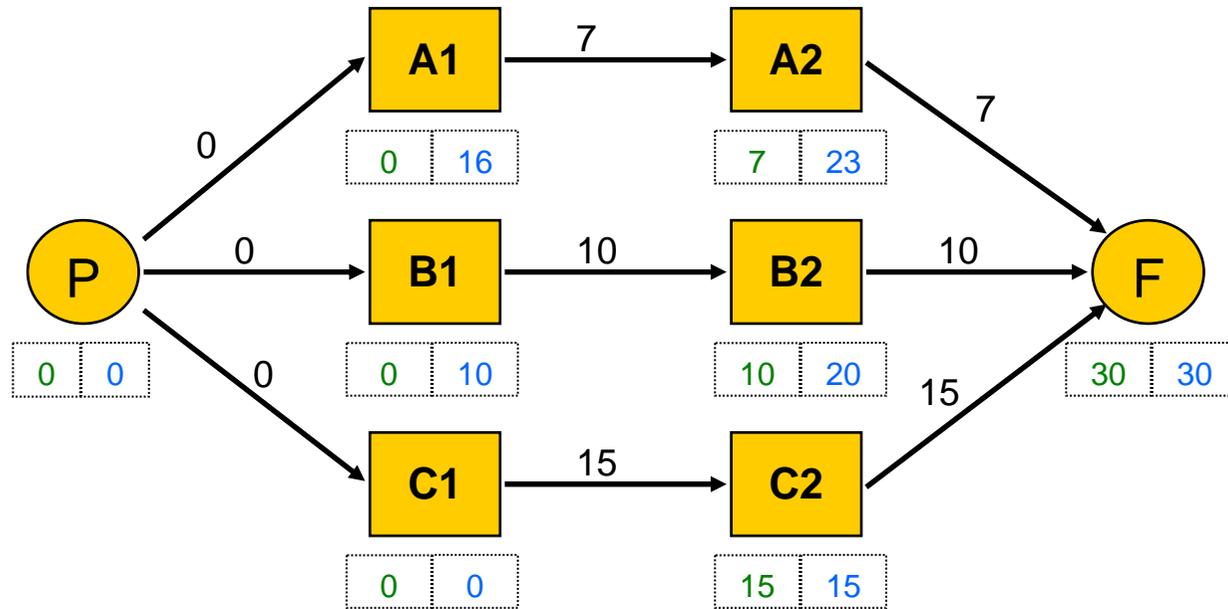
Algoritmo *Manpower Scheduling* (V)

- fechas mínimas de la lista de actividades
- fechas críticas de la lista de espera
- fechas previstas de terminación de la lista de trabajo

Llamemos Δ el aumento de la fecha del reloj.

Paso 4 (actualización): Sumar Δ a las fechas críticas de las actividades de la lista de trabajo y restar dicha cantidad de su duración pendiente. Eliminar de la lista de trabajo las actividades terminadas (duración pendiente nula) devolviendo sus recursos al almacén. Si las tres listas están vacías, el algoritmo ha terminado y la fecha del reloj señala la duración del proyecto; en caso contrario, volver al **paso 1**.

Ejemplo *Manpower Scheduling* (I)



Act.	d	t	T	T'	T''
C1	15	0	0		
B1	10	0	10		
A1	7	0	16		
A2	7	7	23		
B2	10	10	20		
C2	15	15	15		

Orden

- Fecha mínima
- Fecha máxima
- Duración

Ejemplo *Manpower Scheduling* (II)

Act.	d	t	T	T'	T''
C1	15	0	0		
B1	10	0	10		
A1	7	0	16		
A2	7	7	23		
B2	10	10	20		
C2	15	15	15		

H	Act.	T	δ	Γ_c	Act	T	δ	Γ_f	Γ_c	Rec	Dis Rec	Fin
0	C1	0	0	0								
	B1	10	0	10								
	A1	16	0	16								
0	A1	16	0	16	C1	0	0	15	0	1	1	
					B1	10	0	10	10	1	0	
7	A1	16	0	16	C1	0	7	15	7	1	1	
	A2	23	0	23	B1	10	7	10	17	1	0	
10	A2	23	0	23	C1	0	10	15	10	1	1	B1
	B2	20	0	20	A1	16	0	17	16	1	0	
15	A2	23	0	23	A1	16	5	17	21	1	1	C1
	B2	20	0	20	C2	15	0	30	15	1	0	
17	A2	23	0	23	C2	15	2	30	17	1	1	A1
					B2	20	0	27	20	1	0	
23	A2	23	0	23	C2	15	8	30	23	1	1	
					B2	20	6	27	26	1	0	
23	B2	20	6	26	C2	15	8	30	23	1	1	
					A2	23	0	30	23	1	0	
26	B2	20	6	26	C2	15	11	30	26	1	1	
					A2	23	3	30	26	1	0	

Ejemplo *Manpower Scheduling* (III)

Act.	d	t	T	T'	T''
C1	15	0	0	1	
B1	10	0	10	11	
A1	7	0	16	17	
A2	7	7	23	24	
B2	10	10	20	21	
C2	15	15	15	16	

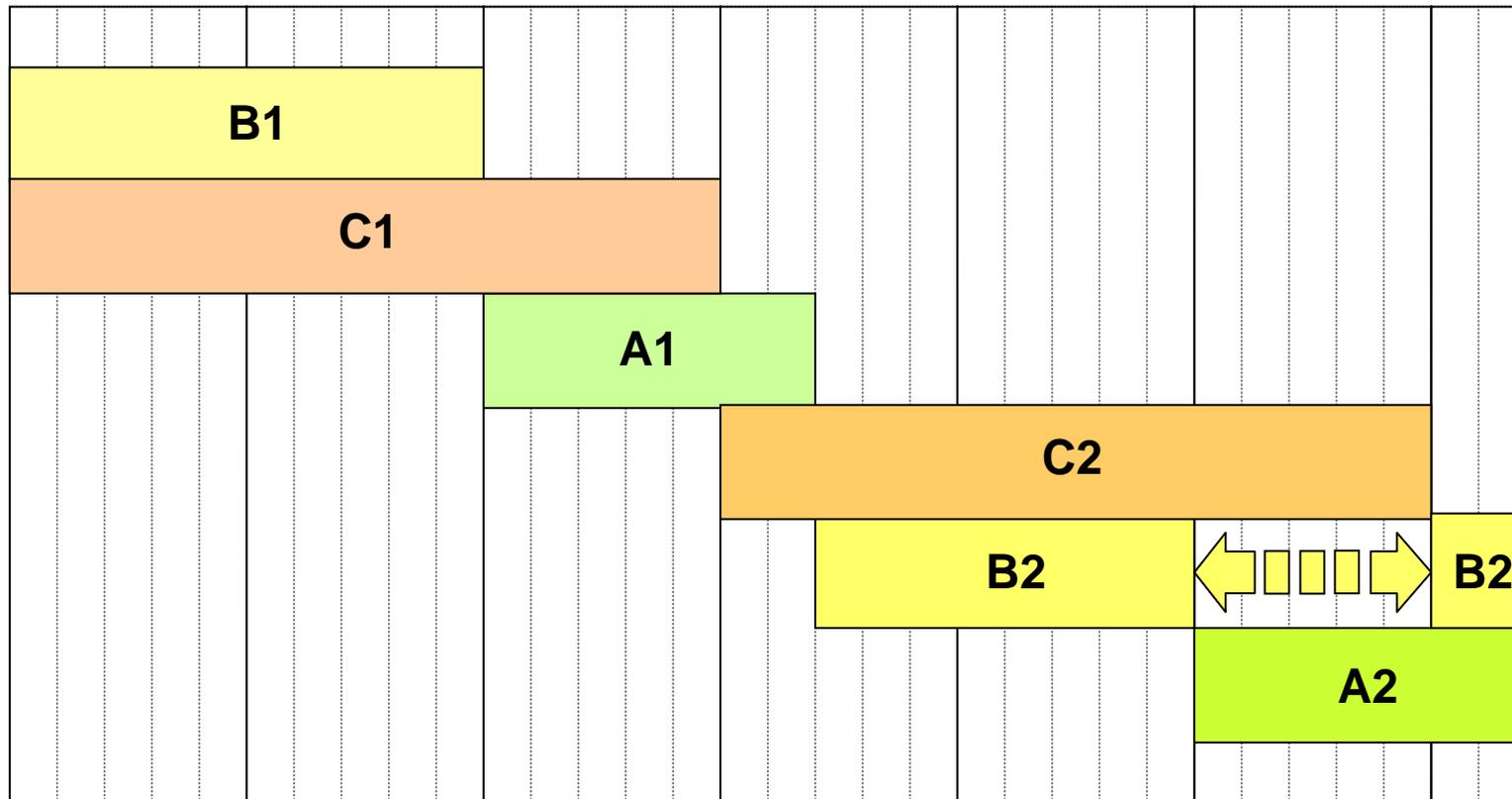
H	Act.	T'	δ	Γ_c	Act	T'	δ	Γ_f	Γ_c	Rec	Dis Rec	Fin
0	C1 B1 A1	1 11 17	0 0 0	1 11 17								
0	A1	17	0	17	C1 B1	1 11	0 0	15 10	1 11	1 1	1 0	
7	A1 A2	17 24	0 0	17 24	C1 B1	1 11	7 7	15 10	8 18	1 1	1 0	
10	A2 B2	24 21	0 0	24 21	C1 A1	1 17	10 0	15 17	11 17	1 1	1 0	B1
15	A2 B2	24 21	0 0	24 21	A1 C2	17 16	5 0	17 30	22 16	1 1	1 0	C1
17	A2	24	0	24	C2 B2	16 21	2 0	30 27	18 21	1 1	1 0	A1
24	A2	24	0	24	C2 B2	16 21	9 7	30 27	25 28	1 1	1 0	
24	B2	21	7	28	C2 A2	16 24	9 0	30 31	25 24	1 1	1 0	
28	B2	21	7	28	C2 A2	16 24	13 4	30 31	29 28	1 1	1 0	
28	C2	16	13	29	A2 B2	24 21	4 7	31 31	28 28	1 1	1 0	
29	C2	16	13	29	A2 B2	24 21	5 8	31 31	29 29	1 1	1 0	

Ejemplo *Manpower Scheduling* (IV)

Act.	d	t	T	T'	T''
C1	15	0	0	1	2
B1	10	0	10	11	12
A1	7	0	16	17	18
A2	7	7	23	24	25
B2	10	10	20	21	22
C2	15	15	15	16	17

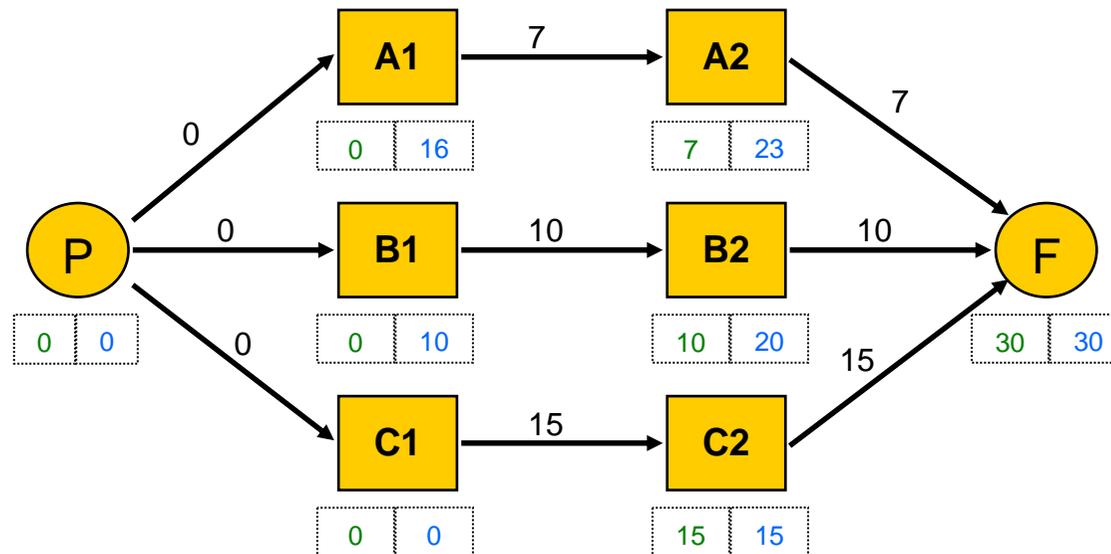
H	Act.	T''	δ	Γ_c	Act	T''	δ	Γ_f	Γ_c	Rec	Dis Rec	Fin
0	C1	2	0	2								
	B1	12	0	12								
	A1	18	0	18								
0	A1	18	0	18	C1	2	0	15	2	1	1	
					B1	12	0	10	12	1	0	
7	A1	18	0	18	C1	2	7	15	9	1	1	
	A2	25	0	25	B1	12	7	10	19	1	0	
10	A2	25	0	25	C1	2	10	15	12	1	1	B1
	B2	22	0	22	A1	18	0	17	18	1	0	
15	A2	25	0	25	A1	18	5	17	23	1	1	C1
	B2	22	0	22	C2	17	0	30	17	1	0	
17	A2	25	0	25	C2	17	2	30	19	1	1	A1
					B2	22	0	27	22	1	0	
25	A2	25	0	25	C2	17	10	30	27	1	1	
					B2	22	8	27	30	1	0	
25	B2	22	8	30	C2	17	10	30	27	1	1	
					A2	25	0	32	25	1	0	
30					A2	25	5	32	30	1	1	C2
					B2	22	8	32	30	1	0	
32												A2 B2

Ejemplo *Manpower Scheduling* (V)



Ejemplo de aplicación. Problemas de equilibrado

Se desea pulir por ambas caras tres discos de diferente tamaño, disponiéndose sólo de dos máquinas pulidoras idénticas para hacerlo. Las duraciones de las operaciones son 7, 10 y 15 u.t. (pulido de una cara de cada uno de los discos).



$$T=32$$

$$\Delta = \sum_{t=1}^{T=32} \max(0, r_t - R)$$

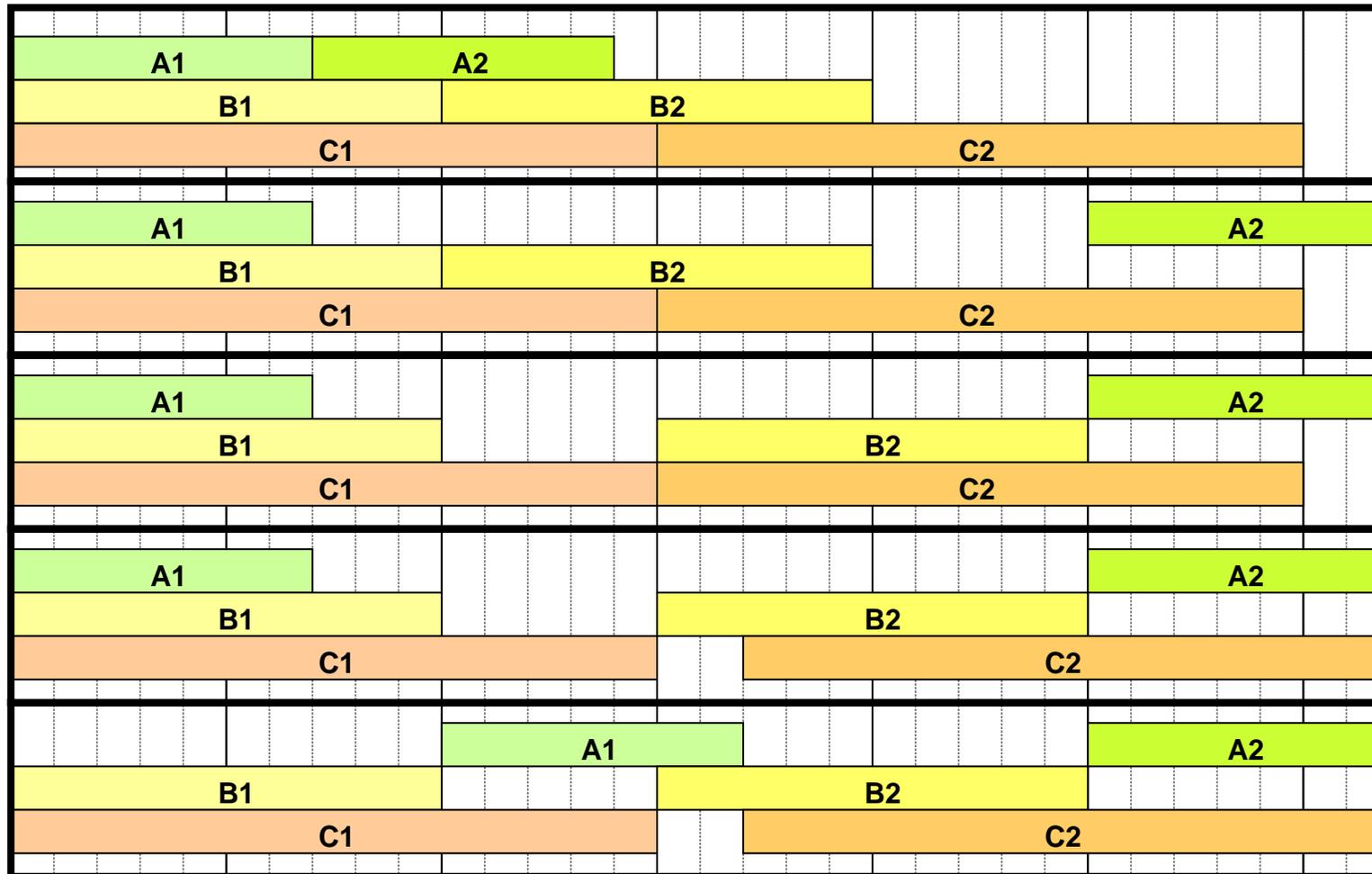
Burgess y Killebrew

- Algoritmo de mejora donde, paulatinamente, se intenta reducir la sobrecarga, Δ , de la solución en curso.

$$\Delta = \sum_{t=1}^T \max(0, r_t - R)$$

- Se parte de la solución obtenida por fechas mínimas de inicio según ligaduras potenciales.
- Para mejorar la sobrecarga de la solución en curso, se desplaza una actividad desde su fecha de inicio actual hasta la fecha de inicio más tardía con sobrecarga mínima.
- La tarea a desplazar se selecciona usando una lista ordenada de actividades por un criterio preestablecido (por ejemplo, orden lexicográfico).

Ejemplo de aplicación del algoritmo de Burgess y Killebrew



$$\Delta = 14$$

$$\Delta = 7$$

$$\Delta = 7$$

$$\Delta = 7$$

$$\Delta = 0$$

Procedimientos greedy

- **Algoritmo constructivo ideal para la resolución de problemas con mas de un recurso.**
- **Se parte de una ordenación de las tareas según un índice de prioridad basado en alguna de las características de las actividades.**
- **Se secuencian las actividades (asignación de un instante de inicio) siguiendo un esquema en serie o en paralelo.**
- **Cuando todas las actividades han sido secuenciadas, se dispone de una solución.**

Índices de prioridad

- **Existen gran variedad de índices de prioridad para determinar el orden en que tratar las reglas. Entre ellas:**
- **Duración de las actividades**
 - ◆ Secuenciar primero aquellas actividades con mayor duración
- **Duración de las actividades sucesoras (o sucesoras inmediatas)**
 - ◆ Secuenciar primero aquellas actividades con mayor valor del índice
- **Número de sucesoras (o sucesoras inmediatas)**
 - ◆ Secuenciar primero aquellas actividades con mayor número de sucesoras

La ordenación debe respetar reglas de precedencia

Secuenciación en paralelo y en serie

■ Secuenciación en paralelo:

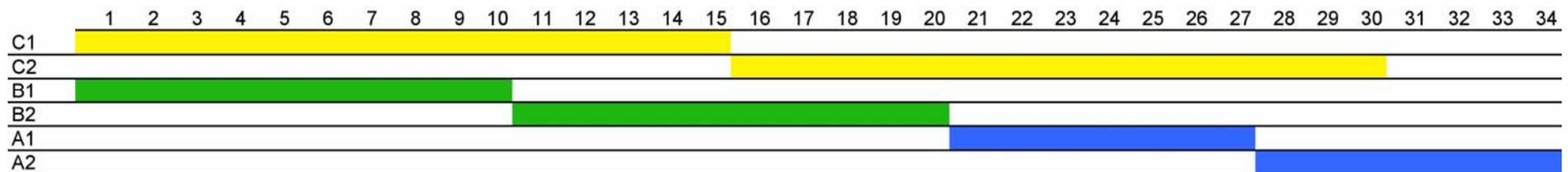
- ◆ Se secuencian todas las actividades posibles en un instante de tiempo (denominado instante de reloj).
- ◆ Cuando no pueden secuenciarse mas actividades en ese instante de reloj, se pasa al siguiente instante en que pueden secuenciarse actividades (adelanto del instante de reloj).

■ Secuenciación en serie:

- ◆ Se seleccionan las actividades según aparecen en la lista y se sitúan en el primer instante posible según precedencias y recursos.

Ejemplo, secuenciación en paralelo

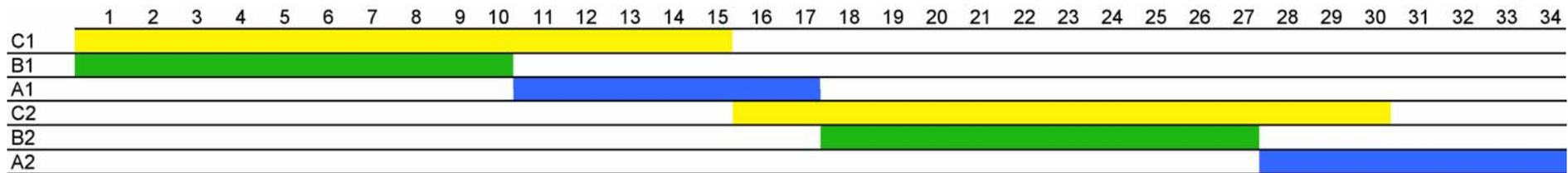
- Regla duración actividades. Orden (C1,C2,B1,B2,A1,A2)
- Reloj=0, se secuencia C1 y B1
- Reloj=10, se secuencia B2
- Reloj=15, se secuencia C2
- Reloj=20, se secuencia A1
- Reloj=27 se secuencia A2



Duración total: 34

Ejemplo, secuenciación en serie

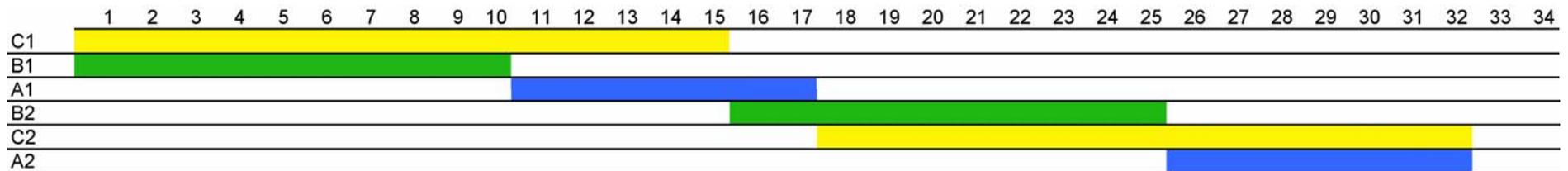
- Regla duración sucesoras, desempate por duración de las actividades (C1, B1,A1,C2,B2,A2)
- Se secuencia C1 y B1 en el instante 0
- A1 puede secuenciarse a partir del instante 10...



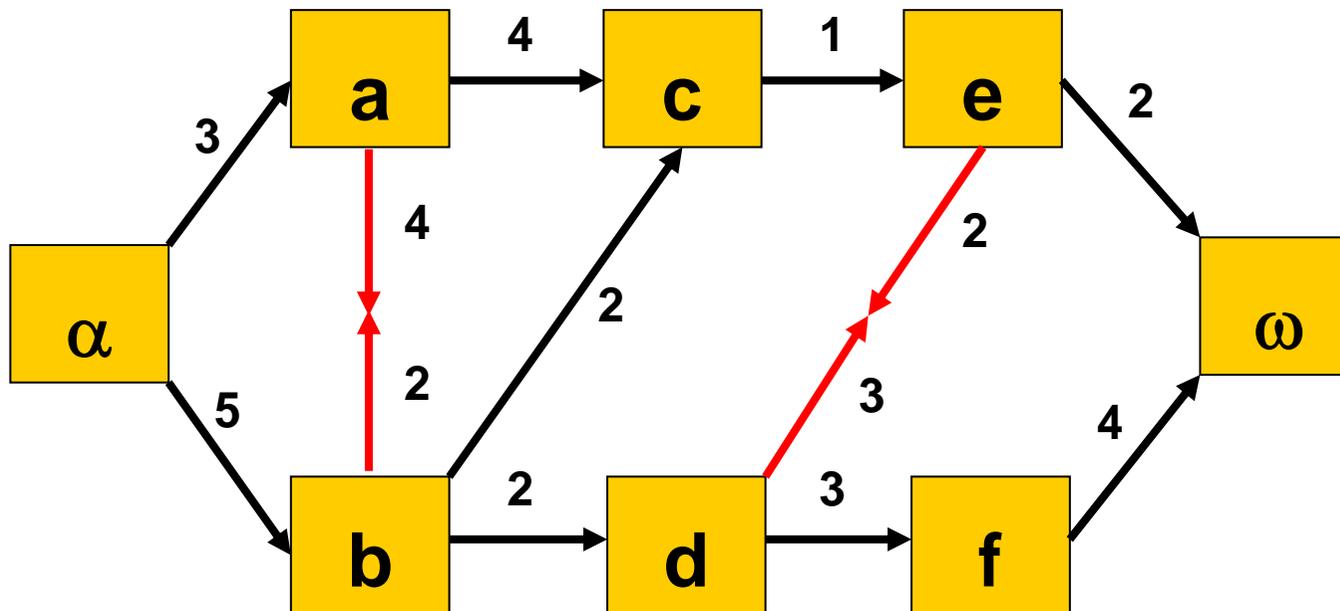
Duración total: 34

Una secuencia al azar (serie)

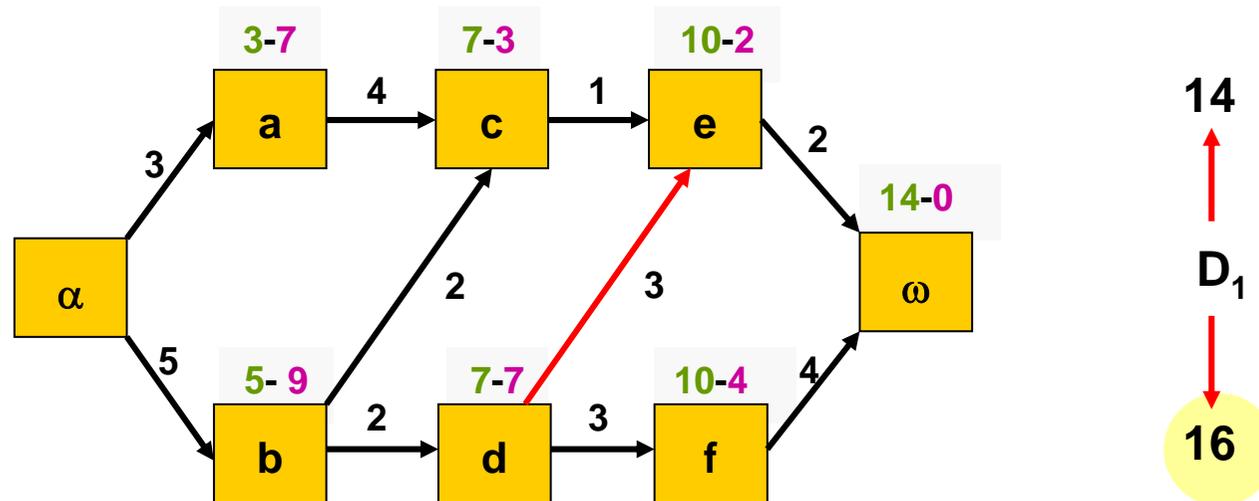
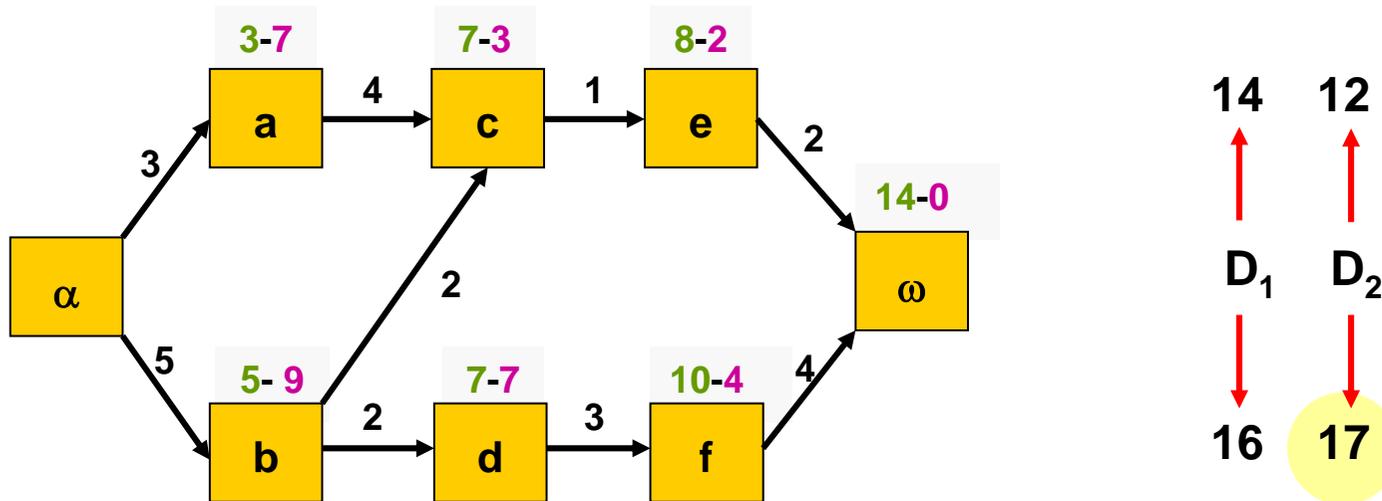
■ C1, B1, A1, B2, C2, A2



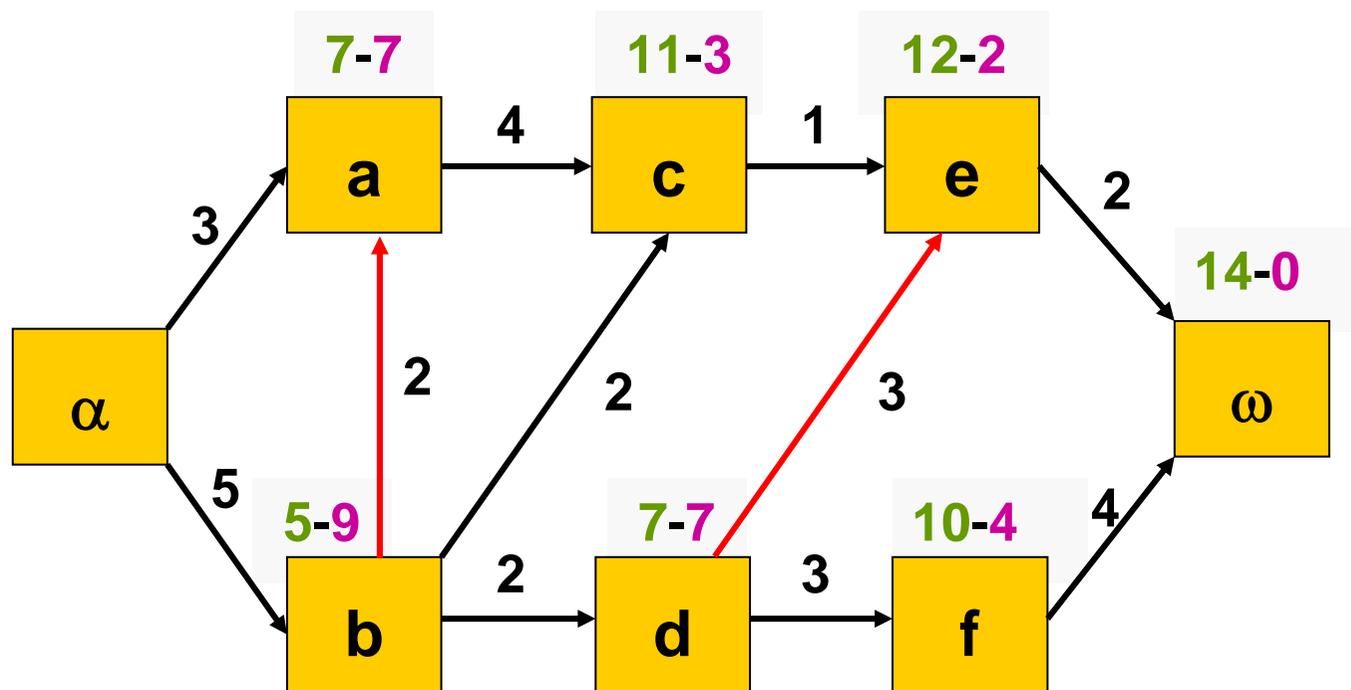
Problemas disyuntivos



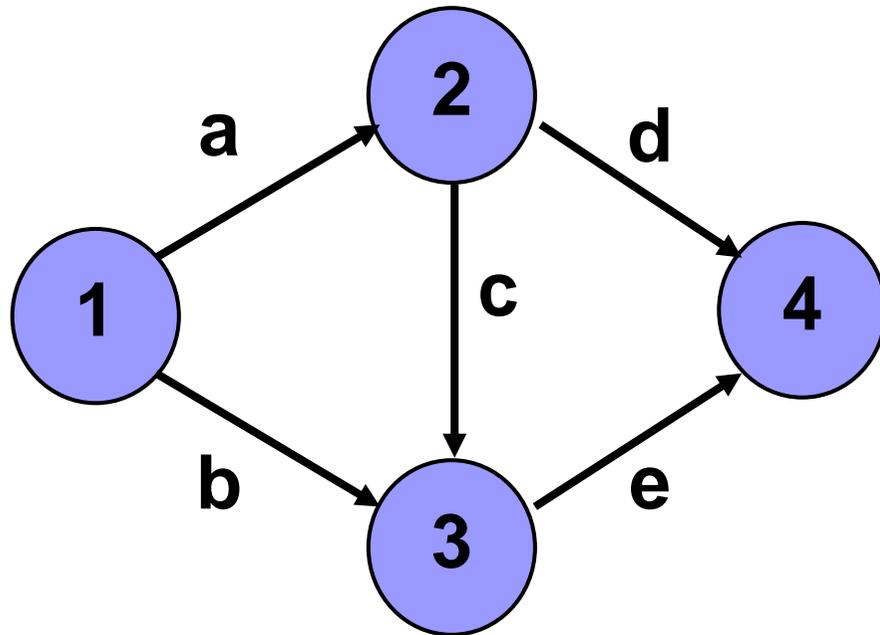
Problemas disyuntivos: método heurístico



Problemas disyuntivos: método heurístico



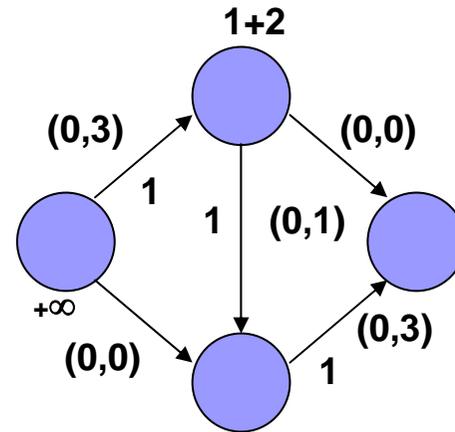
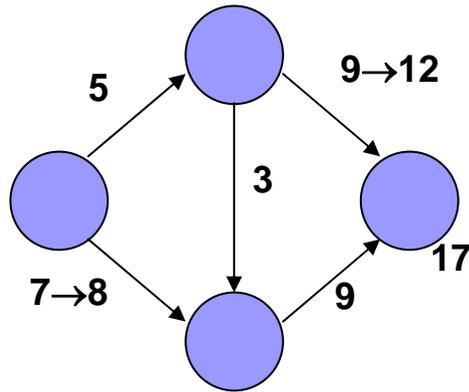
MCX (EJEMPLO)



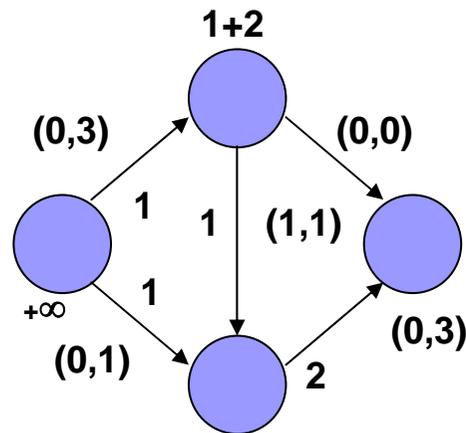
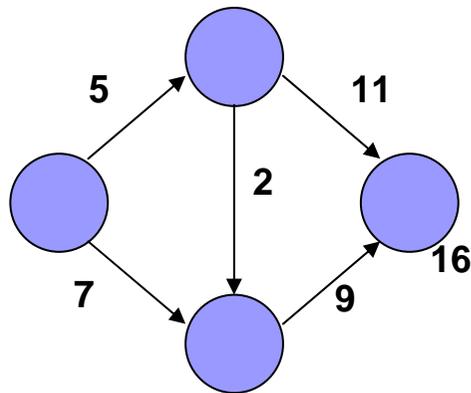
ACT	d_A	d_N	C_A	C_N	C_U
a	1	5	22	10	3
b	5	7	5	3	1
c	1	3	6	4	1
d	6	9	11	5	2
e	1	9	42	18	3

40

MCX (Iteraciones-1)

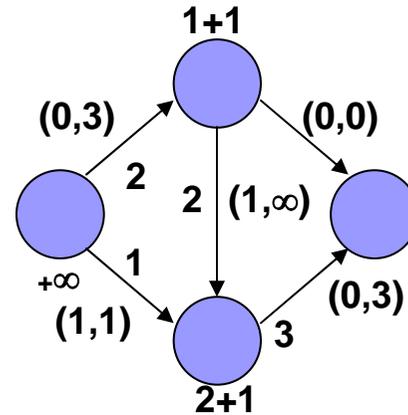
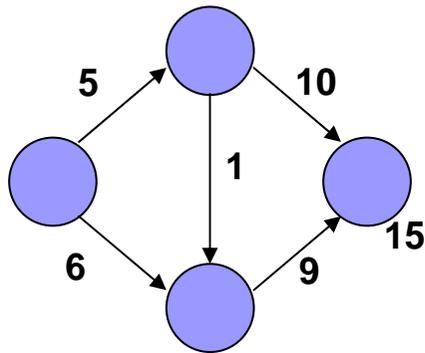


$\phi = 1$
 $T = \{b, c, d\}$
 $\delta = 1$ (b)
 $\Delta C = 1$

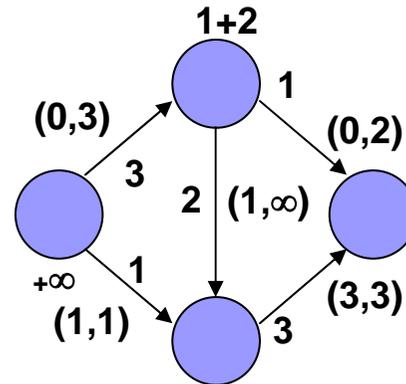
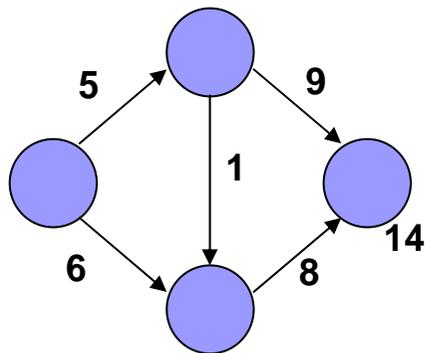


$\phi = 2$
 $T = \{b, c, d\}$
 $\delta = 1$ (c)
 $\Delta C = 2$

MCX (Iteraciones-2)

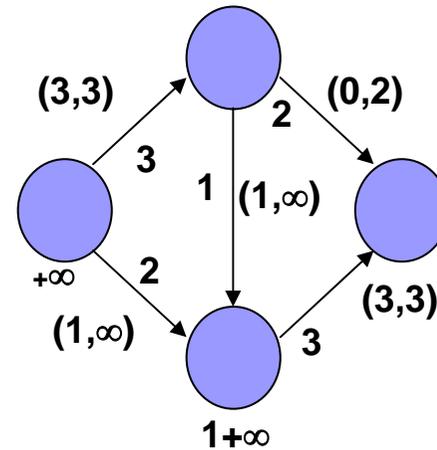
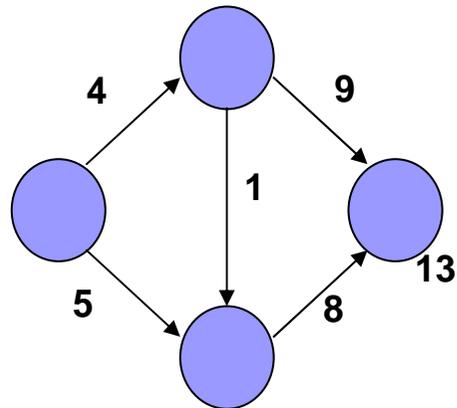


$\phi = 3$
 $T = \{d, e\}$
 $\delta = 1 (d, e)$
 $\Delta C = 3$

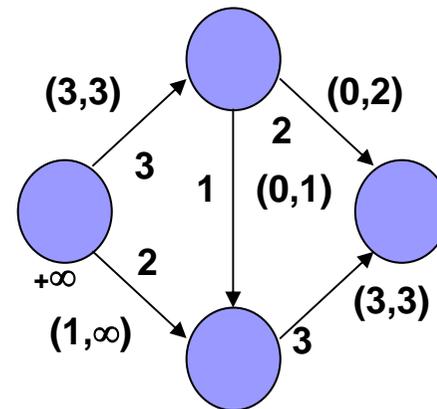
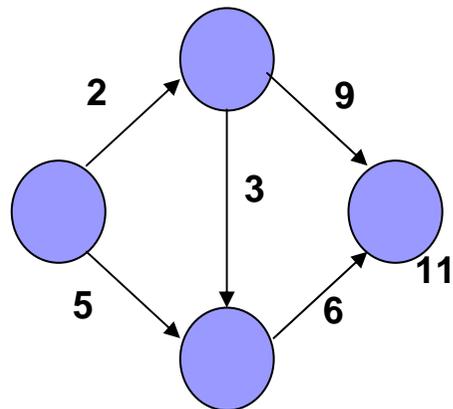


$\phi = 4$
 $T = \{a, b\}$
 $\delta = 1 (a, b)$
 $\Delta C = 4$

MCX (Iteraciones-3)

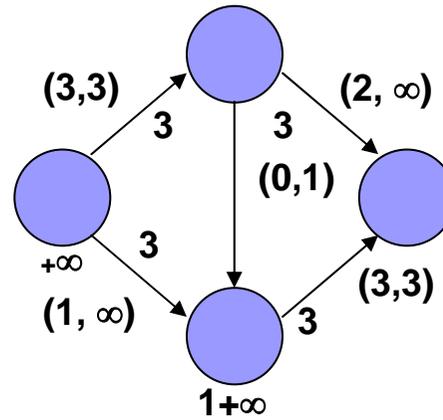
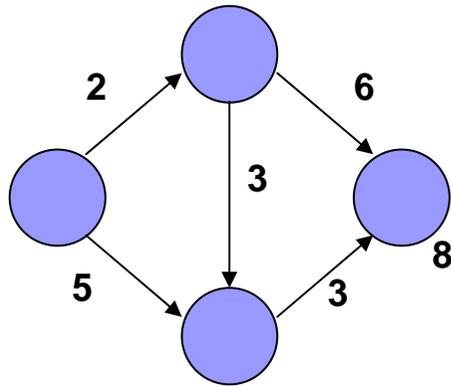


$\phi = 5$
 $T = \{a, e, -c\}$
 $\delta = 2 \ (-c)$
 $\Delta C = 10$

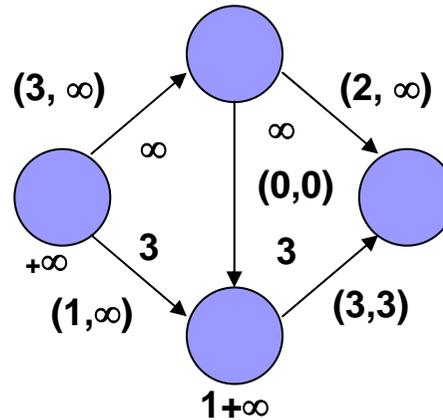
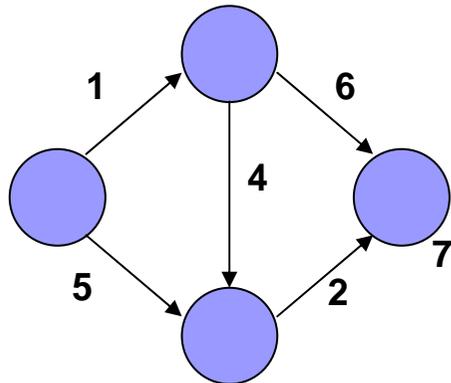


$\phi = 5$
 $T = \{d, e\}$
 $\delta = 3 \ (d)$
 $\Delta C = 15$

MCX (Iteraciones-4)

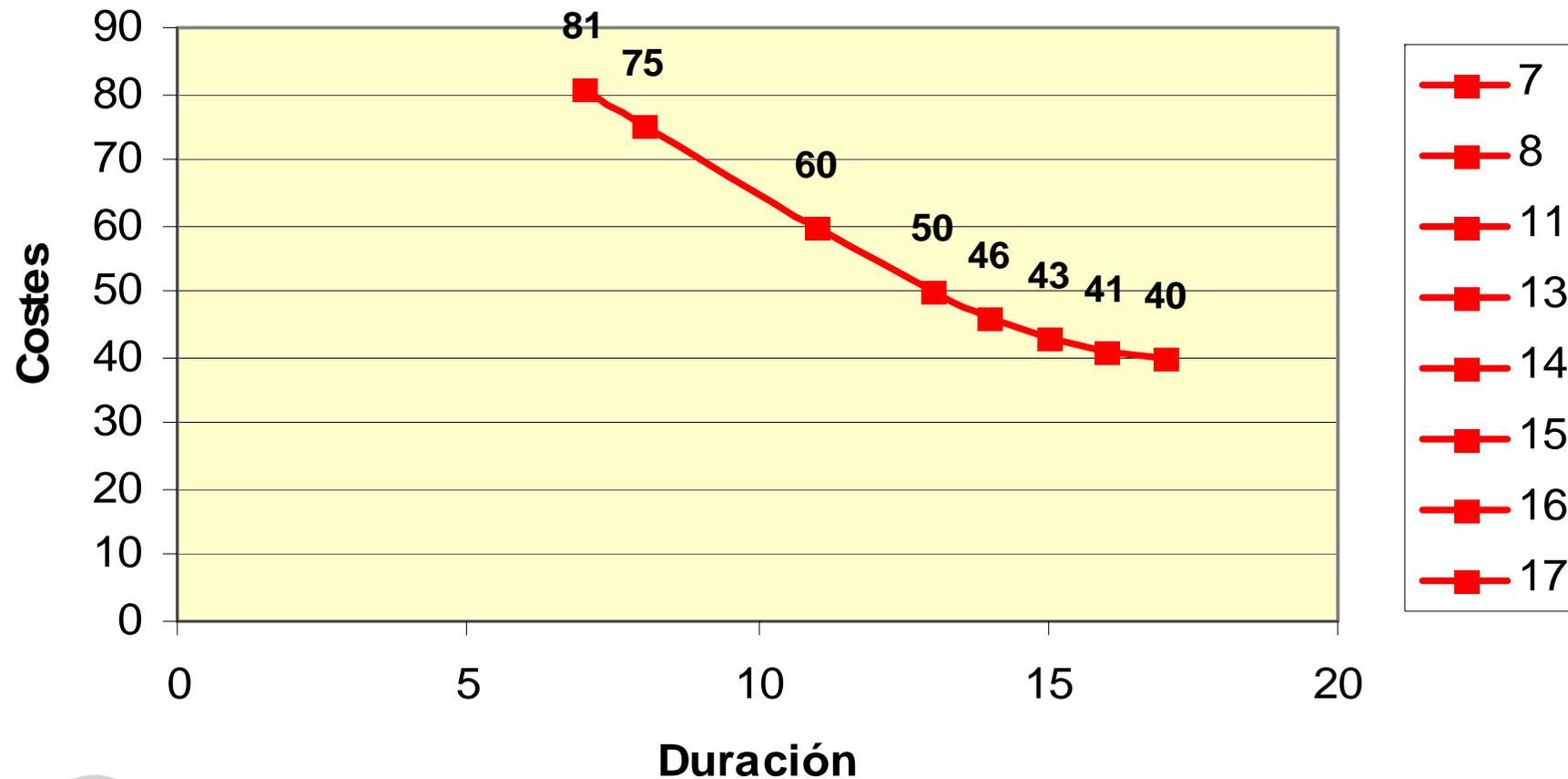


$\phi = 6$
 $T = \{a, e, -c\}$
 $\delta = 1$ (a)
 $\Delta C = 6$



$\phi = \infty$
 $T = \{a, e, -c\}$

MCX: gráfico de costes versus duración



Previsiones

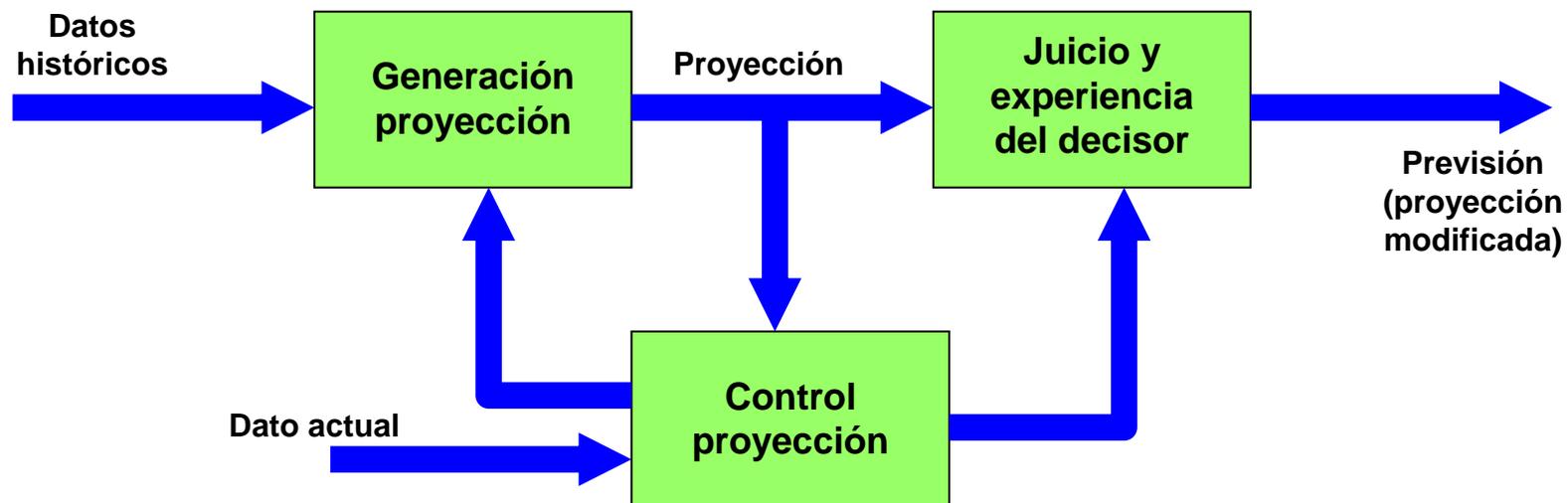


DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

Definición de previsión

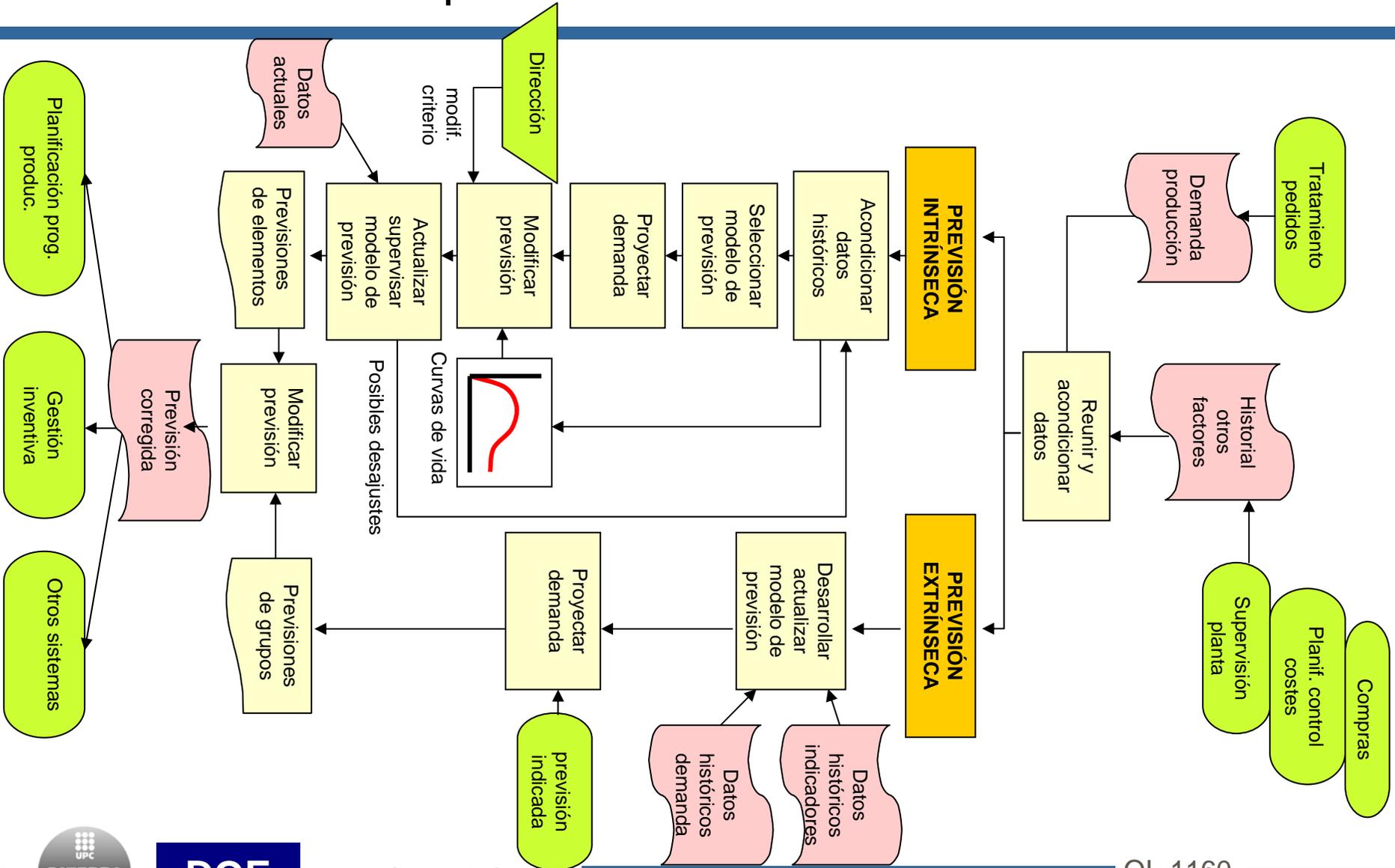
Previsión es la estimación formalizada del valor futuro de cierta variable o grupo de variables (que posiblemente sirven para describir cierto fenómeno)



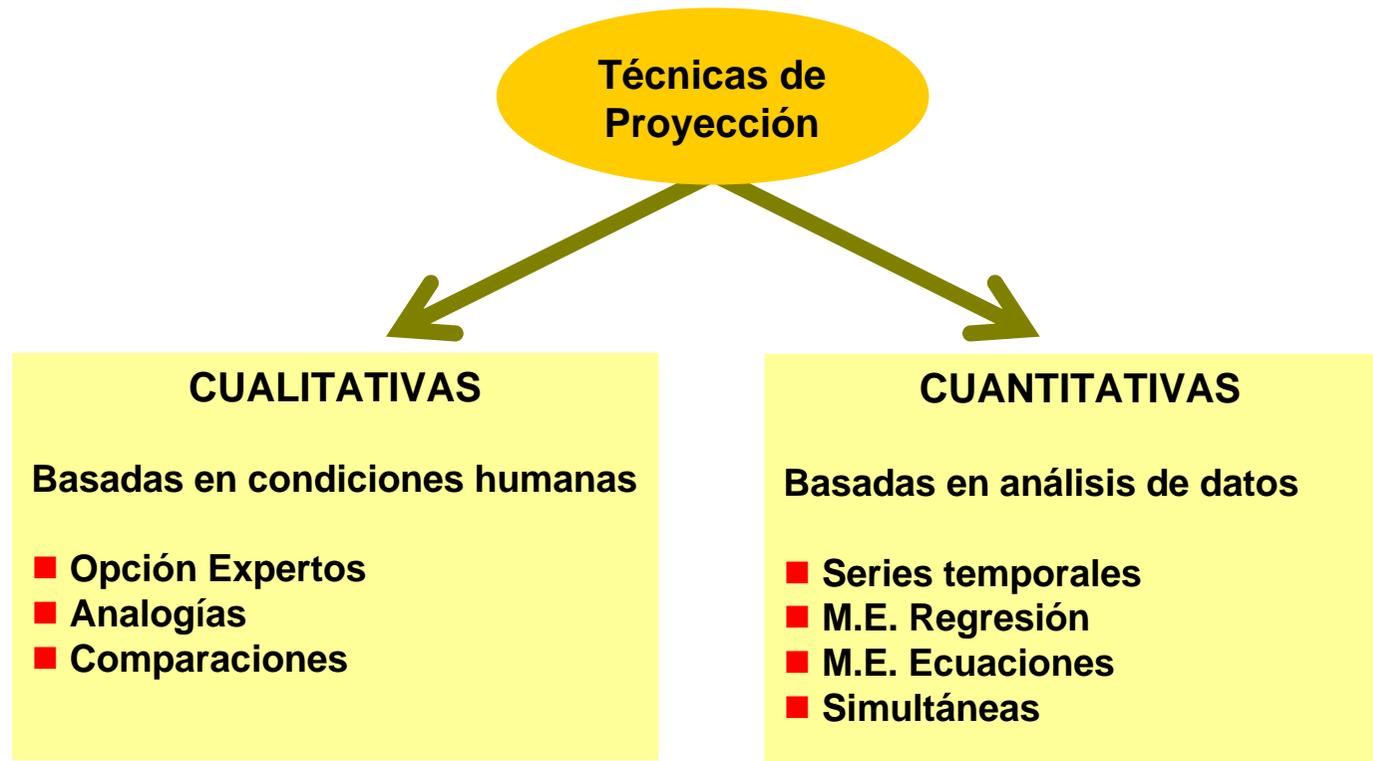
Funciones básicas de la previsión (demanda)

- 1. Acondicionar datos históricos**
- 2. Técnicas de selección de modelos**
- 3. Procedimientos para tratar artículos poco comunes**
- 4. Proyección de la demanda futura.**
- 5. Fácil modificación de la previsión por variación de los criterios de dirección.**
- 6. Técnicas de reducción de datos.**
- 7. Estudio fiabilidad de los modelos.**
- 8. Modelos de previsión extrínsecos (previsión extrínseca o econométrica).**

Elaboración de previsiones de ventas

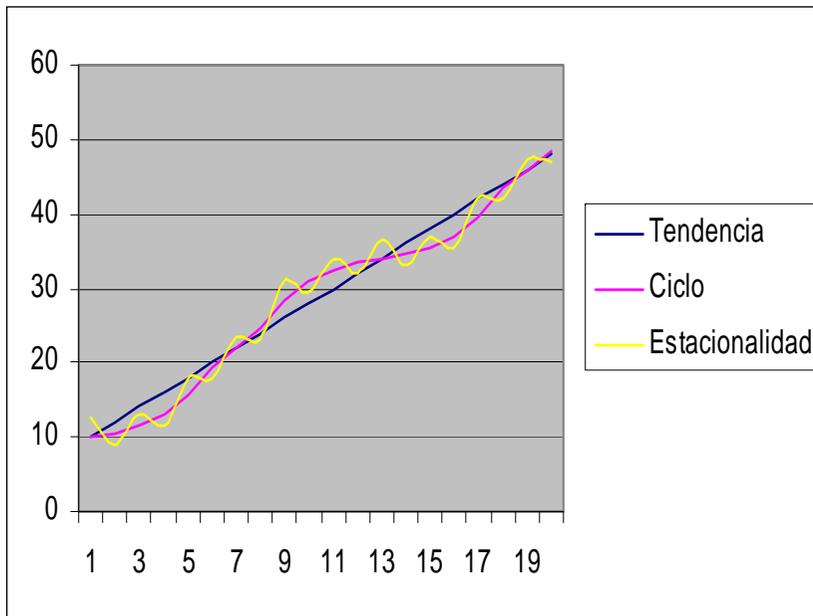


Técnicas de proyección



Series temporales. Elementos

- ◆ **Tendencia**
- ◆ **Estacionalidad**
- ◆ **Ciclicidad**



	Tendencia	Ciclo	Estacionalida
1	10	10	12.5
2	12	10.5	9
3	14	11.5	13
4	16	13	11.5
5	18	15.5	18
6	20	19.5	18
7	22	22	23.5
8	24	24.5	23
9	26	28.5	31
10	28	31	29.5
11	30	32.5	34
12	32	33.5	32
13	34	34	36.5
14	36	34.5	33
15	38	35.5	37
16	40	37	35.5
17	42	39.5	42
18	44	43.5	42
19	46	46	47.5
20	48	48.5	47

Determinación de la tendencia

(1) Ajuste Mínimos Cuadrados

(2) Medias Móviles

(3) Alisado Exponencial

(4) Curvas Especiales

◆ Potencial

◆ Exponencial

◆ Crecimiento con saturación

Mínimos cuadrados

■ Modelo:

$$X_k = a + b \cdot t_k + e_k$$
$$E(e_k) = 0; V[e_k] = \sigma_{\varepsilon_k}$$

■ Método:

$$[\text{MIN}] SS_e = \sum_{t=1}^T [X_t - \hat{a} - \hat{b} \cdot t]^2$$
$$\frac{\partial SS_e}{\partial \hat{a}} = 0; \frac{\partial SS_e}{\partial \hat{b}} = 0$$

■ Resultado:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{k=1}^T X_k \cdot \sum_{k=1}^T t_k^2 - \sum_{k=1}^T t_k \cdot \sum_{k=1}^T t_k \cdot X_k}{T \cdot \sum_{k=1}^T t_k^2 - \left[\sum_{k=1}^T t_k \right]^2}$$
$$\hat{b} = \frac{T \cdot \sum_{k=1}^T t_k \cdot X_k - \sum_{k=1}^T t_k \cdot \sum_{k=1}^T X_k}{T \cdot \sum_{k=1}^T t_k^2 - \left[\sum_{k=1}^T t_k \right]^2}$$

Para $T=12$, $1 \leq t=k \leq T$

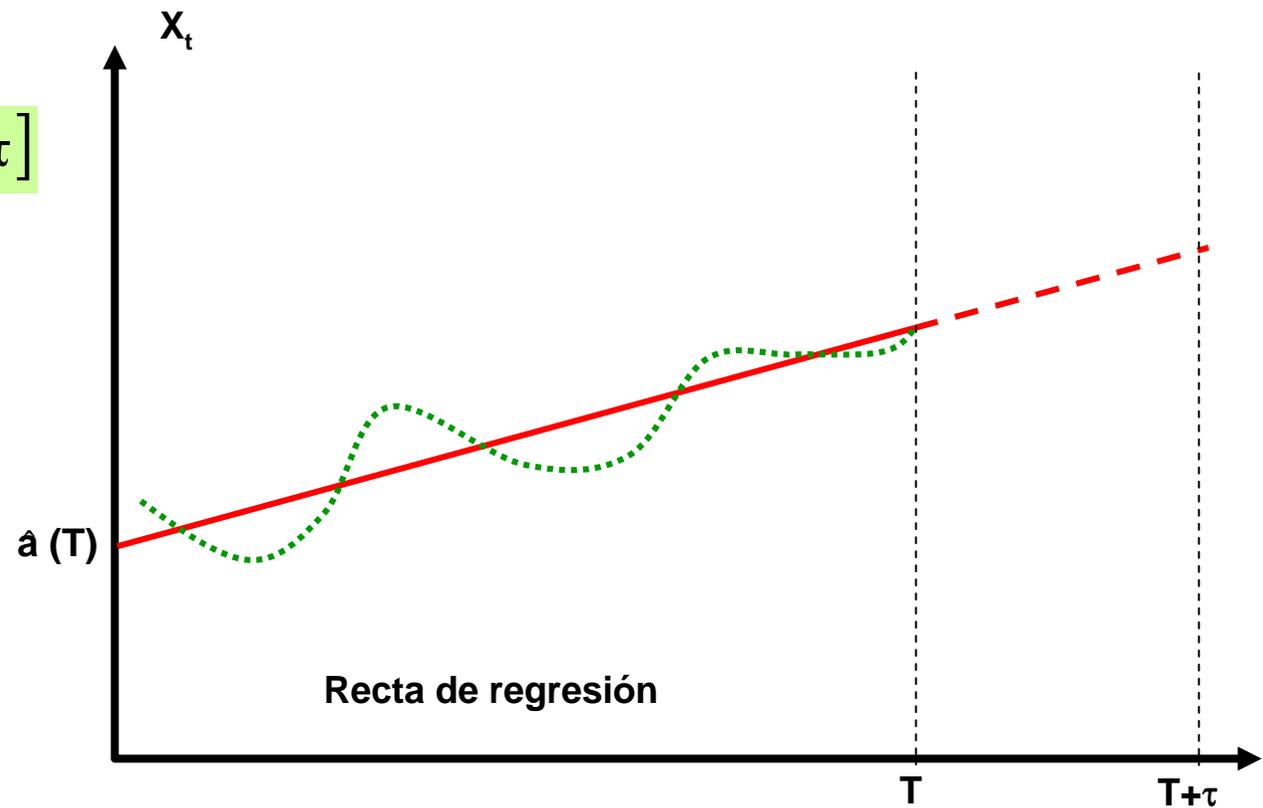
$$\hat{a} = \frac{2 \cdot (2 \cdot T + 1)}{T \cdot (T - 1)} \cdot \sum_{t=1}^T X_t - \frac{6}{T \cdot (T - 1)} \cdot \sum_{t=1}^T t \cdot X_t$$
$$\hat{b} = \frac{12}{T \cdot (T^2 - 1)} \cdot \sum_{t=1}^T t \cdot X_t - \frac{6}{T \cdot (T - 1)} \cdot \sum_{t=1}^T X_t$$

Mínimos cuadrados

- ¿Cómo realizar una previsión?

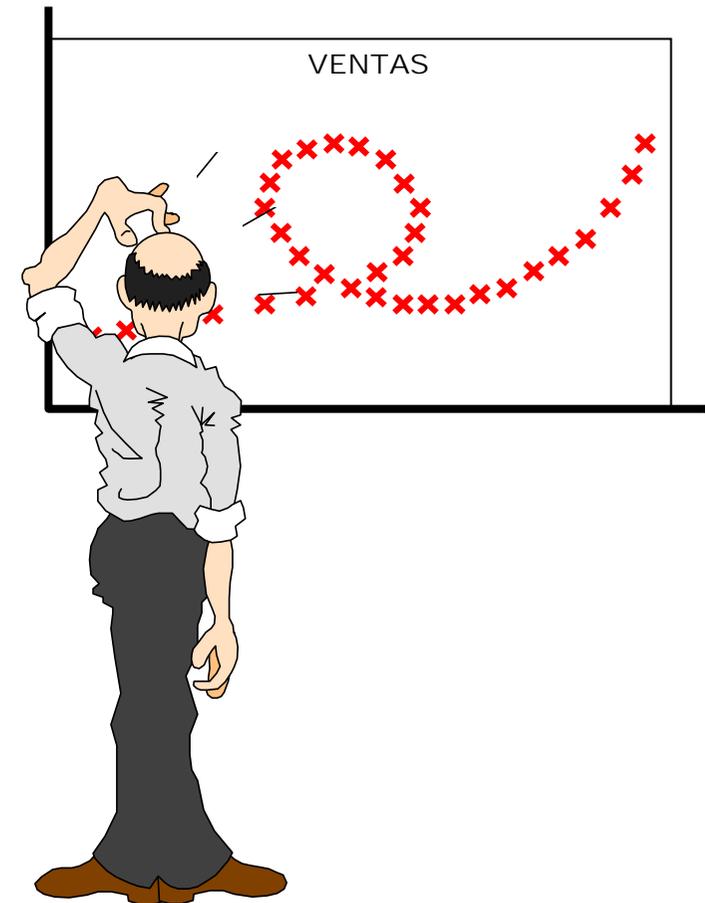
$$\hat{X}_{T+\tau} = \hat{a}(T) + \hat{b}(T) \cdot [T + \tau]$$

- Calcular $\hat{a}(T), \hat{b}(T)$
- Proyectar para $T + \tau$



Ajustes de tendencia especiales

- **Función Potencial**
- **Función Exponencial**
- **Crecimiento con saturación**
 - ◆ Exponencial Modificada
 - ◆ Curva de GOMPERTZ
 - ◆ Curva Logística



Función potencial

■ Modelo

$$X_t = a \cdot t^b + \varepsilon_t$$

$$\text{con } a > 0, X_t > 0, \forall t > 0$$

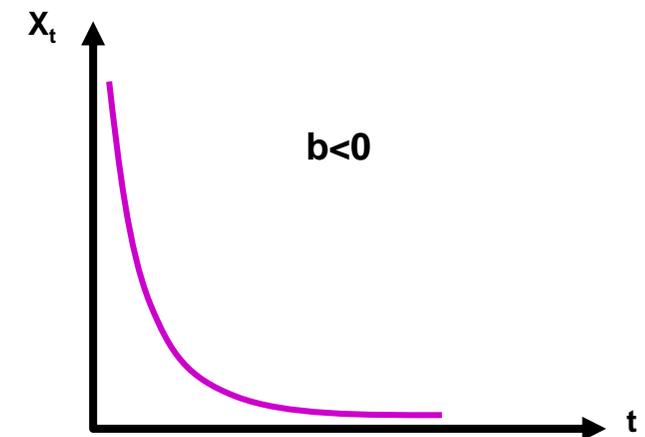
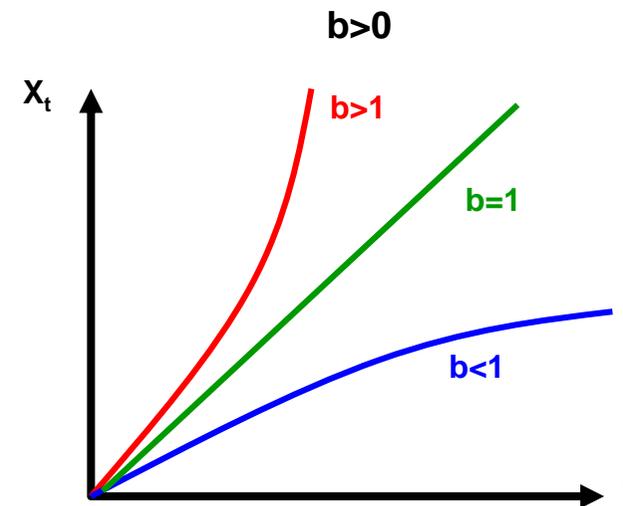
■ Procedimiento

◆ Transformación logarítmica:

$$\begin{aligned} \ln X_t &= \ln a + b \cdot \ln t + \varepsilon'_t \\ X'_t &= a' + b \cdot t' + \varepsilon'_t \end{aligned}$$

◆ Regresión lineal, obtener: a' , b

$$a = e^{a'}$$



Función exponencial

■ Modelo

$$X_t = a \cdot e^{b \cdot t} + \varepsilon_t$$
$$a > 0, X_t > 0$$

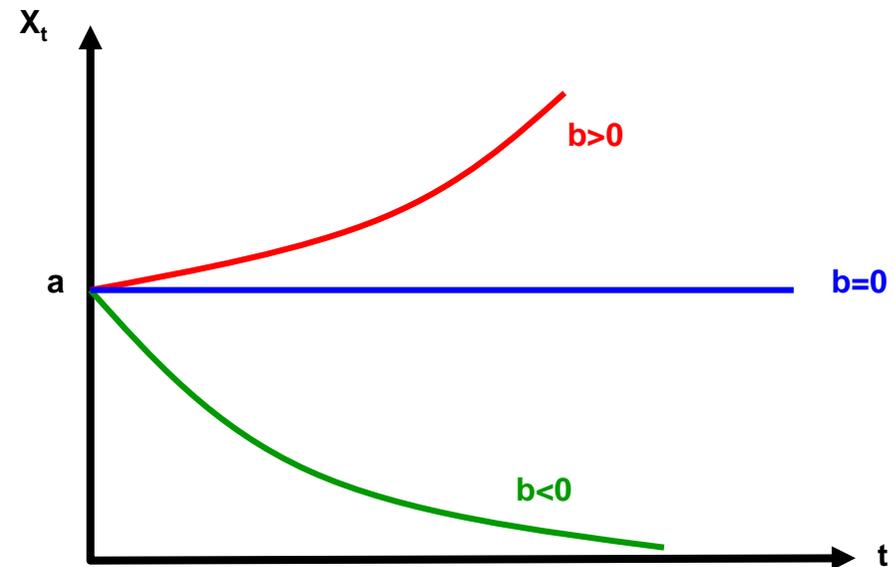
■ Procedimiento

- ◆ Transformación logarítmica:

$$\ln X_t = \ln a + b \cdot t + \varepsilon'_t$$

$$X'_t = a' + b \cdot t + \varepsilon'_t$$

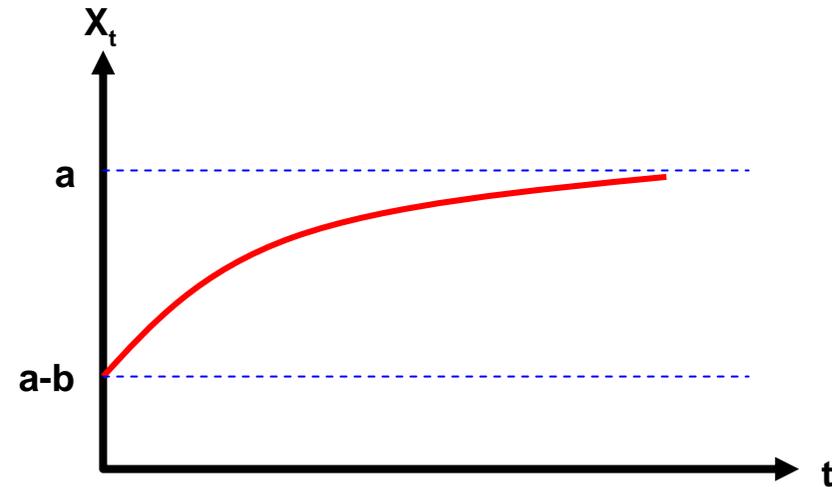
- ◆ Regresión lineal, obtener: a' , b
 $a = e^{a'}$



Curva exponencial con saturación

■ Modelo

$$X_t = a - b \cdot e^{-c \cdot t} + \varepsilon_t$$
$$a, b, c > 0$$



■ Procedimiento

- ◆ $a - X_t = Y_t = b \cdot e^{-ct} - \varepsilon_t$: modelo función exponencial
- ◆ (1) Valor arbitrario para a : $a = \text{MAX}_t (X_t) + \Delta$
- ◆ (2) Calcular: $a - X_t$ (aplicar transformación logarítmica)
- ◆ (3) Estimar: $\text{Ln}(b)$, c (por regresión lineal)
- ◆ (4) Calcular: $SS_E = \sum (X_t - a + b \cdot e^{-ct})^2$
- ◆ (5) Volver a (1) o finalizar.

Curva de Gompertz

■ Modelo

$$X_t = e^{(a-b \cdot e^{-c \cdot t})} + \varepsilon_t$$
$$a, b, c > 0$$

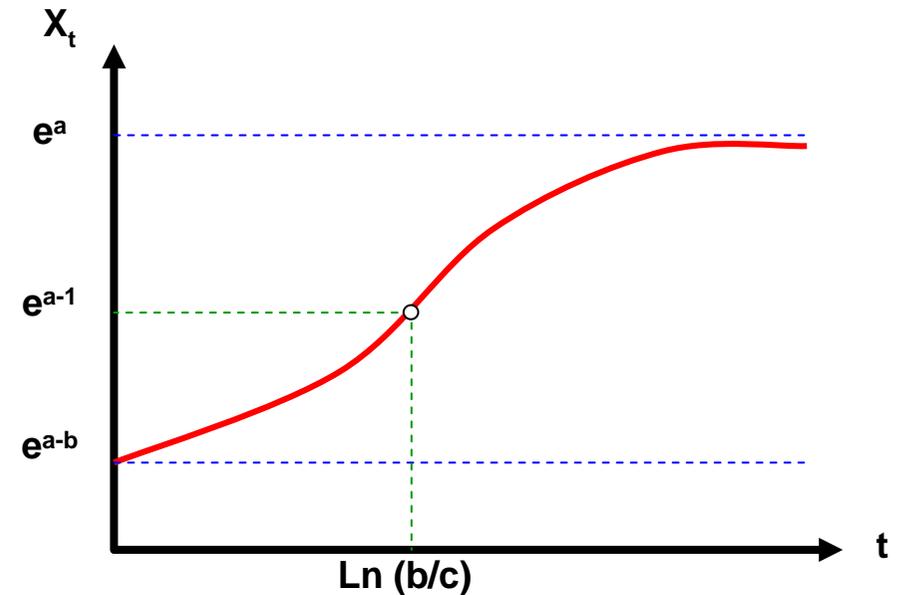
■ Procedimiento

- ◆ Transformación logarítmica:

$$\ln X_t = a - b \cdot e^{-c \cdot t} + \varepsilon'_t$$

$$X'_t = a - b \cdot e^{-c \cdot t} + \varepsilon'_t$$

- ◆ Aplicar procedimiento exponencial con saturación



Curva logística

■ Modelo

$$x_t = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-c \cdot t}} + \varepsilon_t$$

$a, b, c > 0$

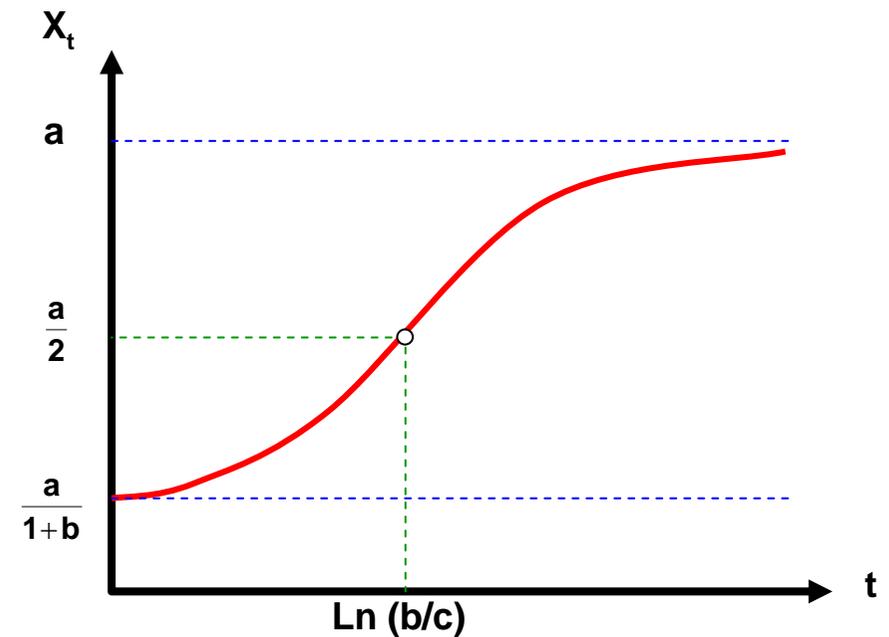
■ Procedimiento

- ◆ Transformación logarítmica:

$$\frac{a - x_t}{x_t} = b \cdot e^{-c \cdot t} \quad X'_t = b \cdot e^{-c \cdot t}$$

- ◆ Valor para a : $a = \max_t (x_t) + \Delta$
- ◆ Aplicar procedimiento función exponencial para minimizar

$$SS_e = \sum_{t=1} (x_t - \frac{a}{1 + b \cdot e^{-c \cdot t}})^2$$

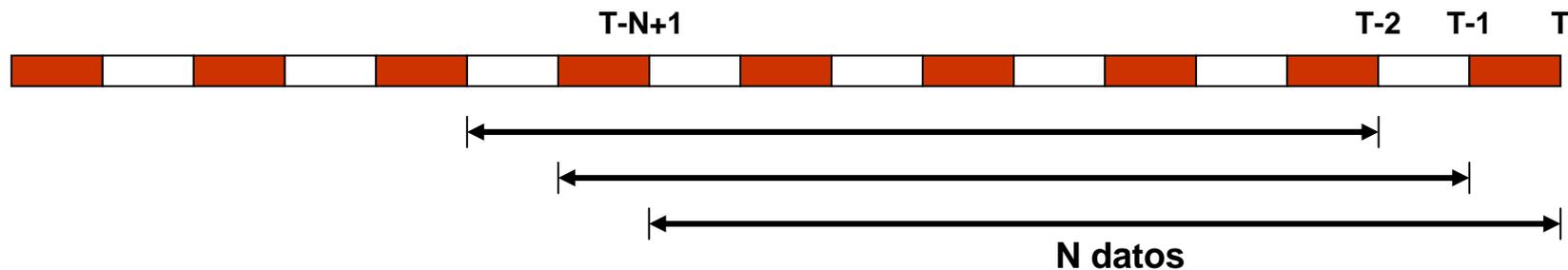


Medias móviles

En lugar de tomar todos los datos para realizar las previsiones se tomarán los N datos más recientes



- Implica suponer que el fenómeno se comporta siguiendo distintas tendencias en distintos segmentos temporales de la serie.
- Permite filtrar y eliminar las componentes periódicas y obtener previsiones con modelos menos rígidos ante datos del pasado.



Variaciones estacionales

■ Forma aditiva

$$X_t = f(t) + C_t + \varepsilon_t$$

$$C_t = C_{t-L}$$

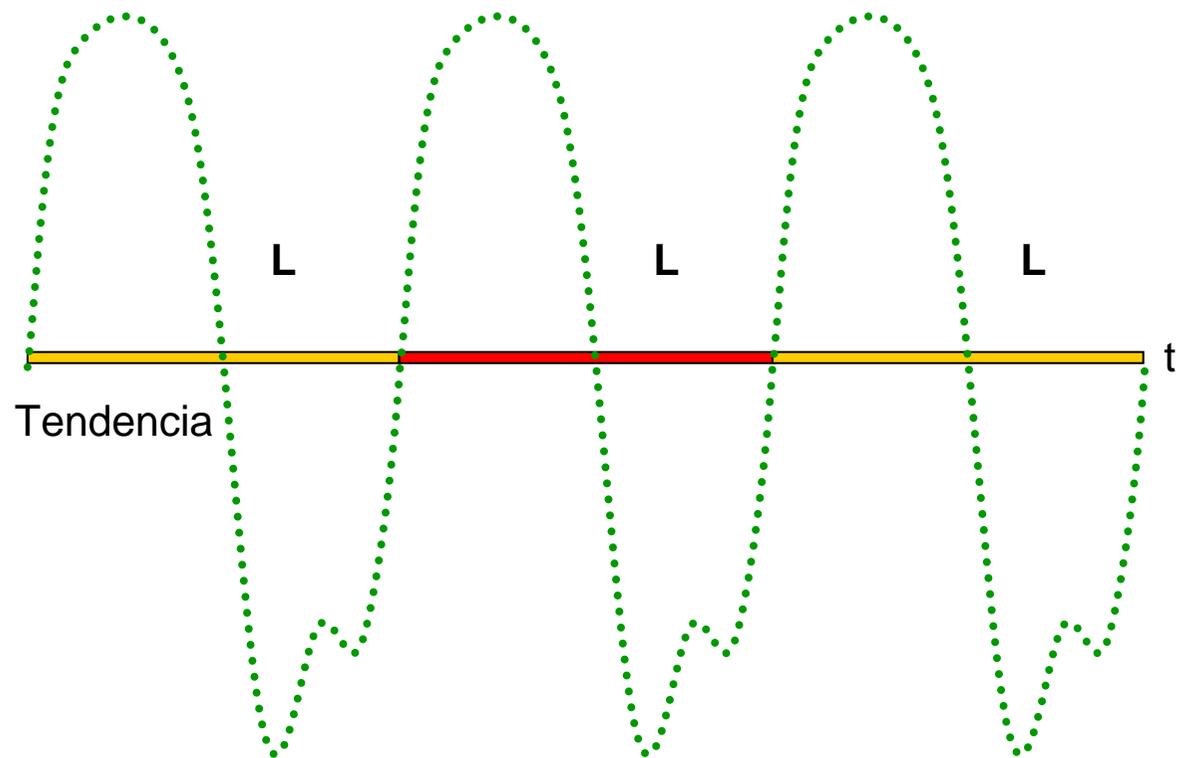
$$\sum_{i=1}^L C_{t-i} = 0$$

■ Forma multiplicativa

$$X_t = f(t) \cdot C_t + \varepsilon_t$$

$$C_t = C_{t-L}$$

$$\sum_{i=1}^L C_{t-i} = L$$



Procedimiento de ajuste con estacionalidad (enfoque heurístico)

- **P0:** Representar gráficamente la serie X_t . Detectar si la serie X_t tiene estacionalidad mediante un filtro: aditiva $M_t^{[1]}$; multiplicativa $M_t^{[2]}$

$$M_t^{[1]} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{\tau=t-L+1}^t X_\tau$$

$$M_t^{[2]} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{\tau=t-L+1}^t M_\tau^{[1]}$$

, para L datos por período

- **P1:** Apostar por una tendencia $f(t)$ y un tipo de estacionalidad (aditiva o multiplicativa). Ajustar los valores de los parámetros de la tendencia (a, b,...) mediante una regresión, (puede ser sobre la serie X_t).

Procedimiento de ajuste con estacionalidad (enfoque heurístico)

- P2: Calcular los valores de los L coeficientes de estacionalidad:

$$\text{Est. multiplicativa: } C_t = \frac{X_t}{f(t)} \quad \text{Est. aditiva: } C_t = X_t - f(t)$$

- ◆ Como (por hipótesis) : $C_t = C_{t-L}$, promediar coeficientes si hay varios.
- ◆ Como (por hipótesis) :

$$\text{Est. multiplicativa: } \sum_{K=1}^L C_K = L \quad \text{Est. aditiva: } \sum_{K=1}^L C_K = 0$$

Corregir coeficientes para que sumen L o 0, según el caso:

$$\text{Est. multiplicativa: } C_i \rightarrow C_i \cdot \frac{L}{\sum_{K=1}^L C_K} \quad \text{Est. aditiva: } C_i \rightarrow C_i - \frac{1}{L} \cdot \sum_{K=1}^L C_K$$

Procedimiento de ajuste con estacionalidad (enfoque heurístico)

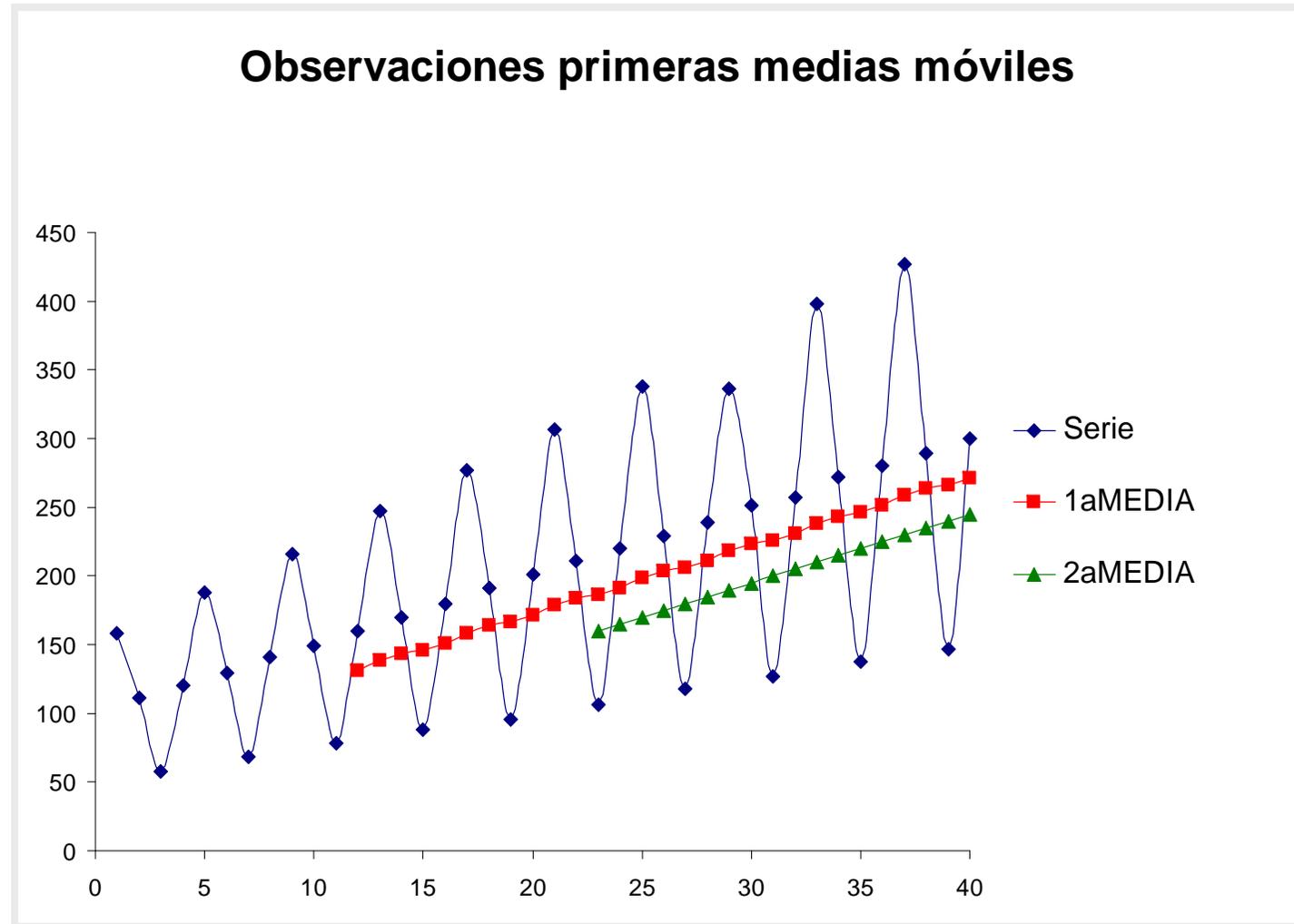
- **P3: Desestacionalizar la serie X_t con los valores de los coeficientes de estacionalidad para obtener la serie Y_t**

Est. multiplicativa: $Y_t = X_t / c_t$ Est. aditiva: $Y_t = X_t - C_t$

- **P4: Ajustar los valores de los parámetros de la tendencia $f(t)$ mediante una regresión sobre la serie Y_t (desestacionalizada).**
- **P5: Calcular, de nuevo, los valores de los L coeficientes de estacionalidad con la tendencia $f(t)$ hallada en P4 y siguiendo el mismo procedimiento expuesto en P2.**
- **P6: Si los coeficientes entre dos cálculos consecutivos son "muy distintos" volver a P3 con los últimos L coeficientes. Si no FIN→(Es buena medida corregir los parámetros de $f(t)$)**

Ejemplo de aplicación (1/2)

Periodo	Serie	1aMEDIA	2aMEDIA
1	158		
2	111		
3	58		
4	120		
5	188		
6	129		
7	68		
8	141		
9	216		
10	149		
11	78		
12	160	131,333	
13	247	138,75	
14	170	143,667	
15	88	146,167	
16	180	151,167	
17	277	158,583	
18	191	163,75	
19	96	166,083	
20	201	171,083	
21	307	178,667	
22	211	183,833	
23	106	186,167	159,938
24	220	191,167	164,924
25	338	198,75	169,924
26	229	203,667	174,924
27	118	206,167	179,924
28	239	211,083	184,917
29	336	218,5	189,91
30	251	223,5	194,889
31	127	226,083	199,889
32	257	230,75	204,861
33	398	238,333	209,833
34	272	243,417	214,799
35	138	246,083	219,792
36	280	251,083	224,785
37	427	258,5	229,764
38	289	263,5	234,75
39	147	265,917	239,729
40	300	271	244,722



Ejemplo de aplicación (2/2)

Regresión sobre las 2as Medias Móviles

Ordenada: 100,1334 -----a
 Pendiente: 4,986097 -----b

Coefficientes estacionales:

Alternativa-1:

$$c1=158/(a+b) \quad c2=247/(a+13b)$$

$$c3=338/(a+25b) \quad c4=427/(a+37b)$$

$$c=(c1+c2+c3+c4)/4=1,5109$$

Alternativa-2

$$c=(158+247+338+427)/(a+b)+(a+13b)+(a+25b)+(a+37b)=1,501006$$

Coefficientes estacionales

Periodo	Coefficiente	Periodo	Coefficiente
1	1,50101	1	1,50072
2	0,99947	2	0,99928
3	0,50161	3	0,50151
4	0,99963	4	0,99944
5	1,49813	5	1,49784
6	1,00237	6	1,00218
7	0,49777	7	0,49767
8	0,99906	8	0,99886
9	1,49872	9	1,49843
10	1,004	10	1,0038
11	0,49966	11	0,49956
12	1,00091	12	1,00072
SUMA	12,0023	SUMA	12

Corrección

a = 100,1529
 b = 4,987066

Error cuadrático: 28,586270
 Desviación tipo: 1,028956

Desestacionalización la serie

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
ENE	105,283	164,588	225,226	284,531
FEB	111,08	170,123	229,165	289,209
MAR	115,651	175,47	235,29	293,115
ABR	120,068	180,102	239,135	300,169
MAY	125,514	184,933	244,352	
JUN	128,72	190,589	250,455	
JUL	136,636	192,898	255,188	
AGO	141,161	201,229	257,293	
SEP	144,151	204,881	265,612	
OCT	148,435	210,2	270,969	
NOV	156,137	212,186	276,243	
DIC	159,885	219,843	279,8	

Regresión sobre los 40 puntos: Ordenada: 100,3128 -----a
 Pendiente: 4,979267 -----b

Recalcular Coeficientes estacionales:

Periodo	Coefficiente	Periodo	Coefficiente
1	1,50063	1	1,50065
2	0,99926	2	0,99927
3	0,50152	3	0,50153
4	0,99949	4	0,99951
5	1,49762	5	1,49764
6	1,00207	6	1,00209
7	0,49764	7	0,49765
8	0,99884	8	0,99886
9	1,49846	9	1,49848
10	1,00386	10	1,00387
11	0,49961	11	0,49961
12	1,00084	12	1,00085
SUMA	11,9998	SUMA	12

Corrección
12/SUMA

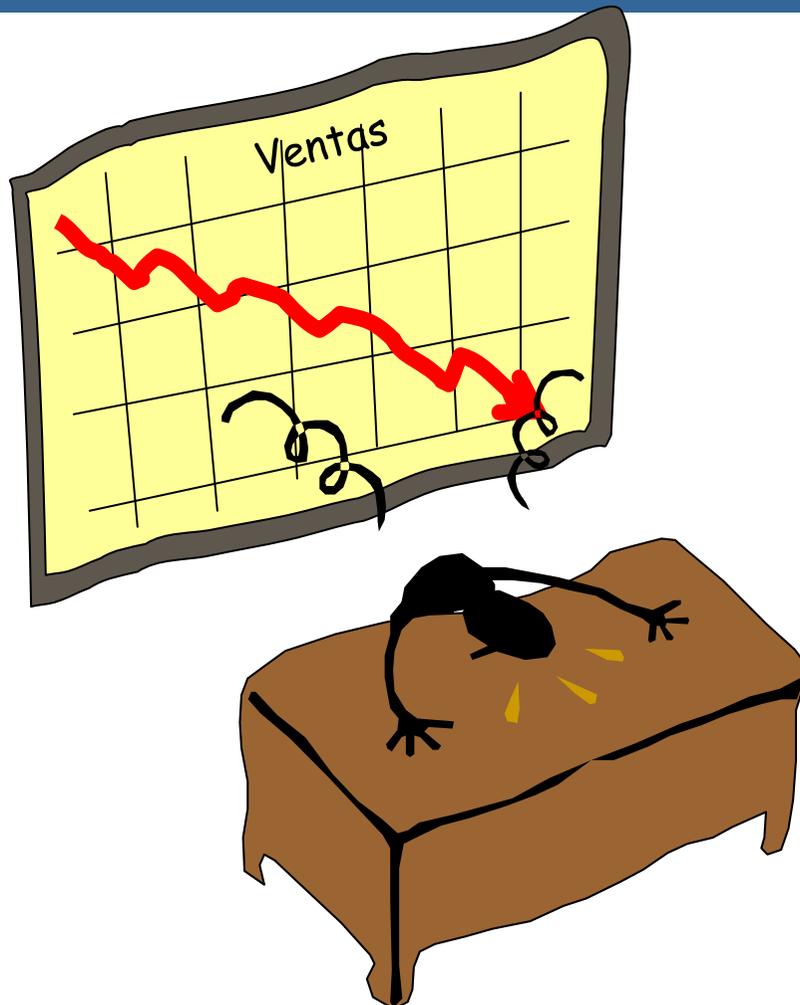
Ordenada: 100,3114 ----a
 Pendiente: 4,979199 ----b

Error cuadrático: 28,99813
 Desviación tipo: 1,036342

MODELO----> $X(40+k)=Ct \cdot [100,3114+(40+K) \cdot 4,979199]$



Planificació



DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

La pirámide de la planificación

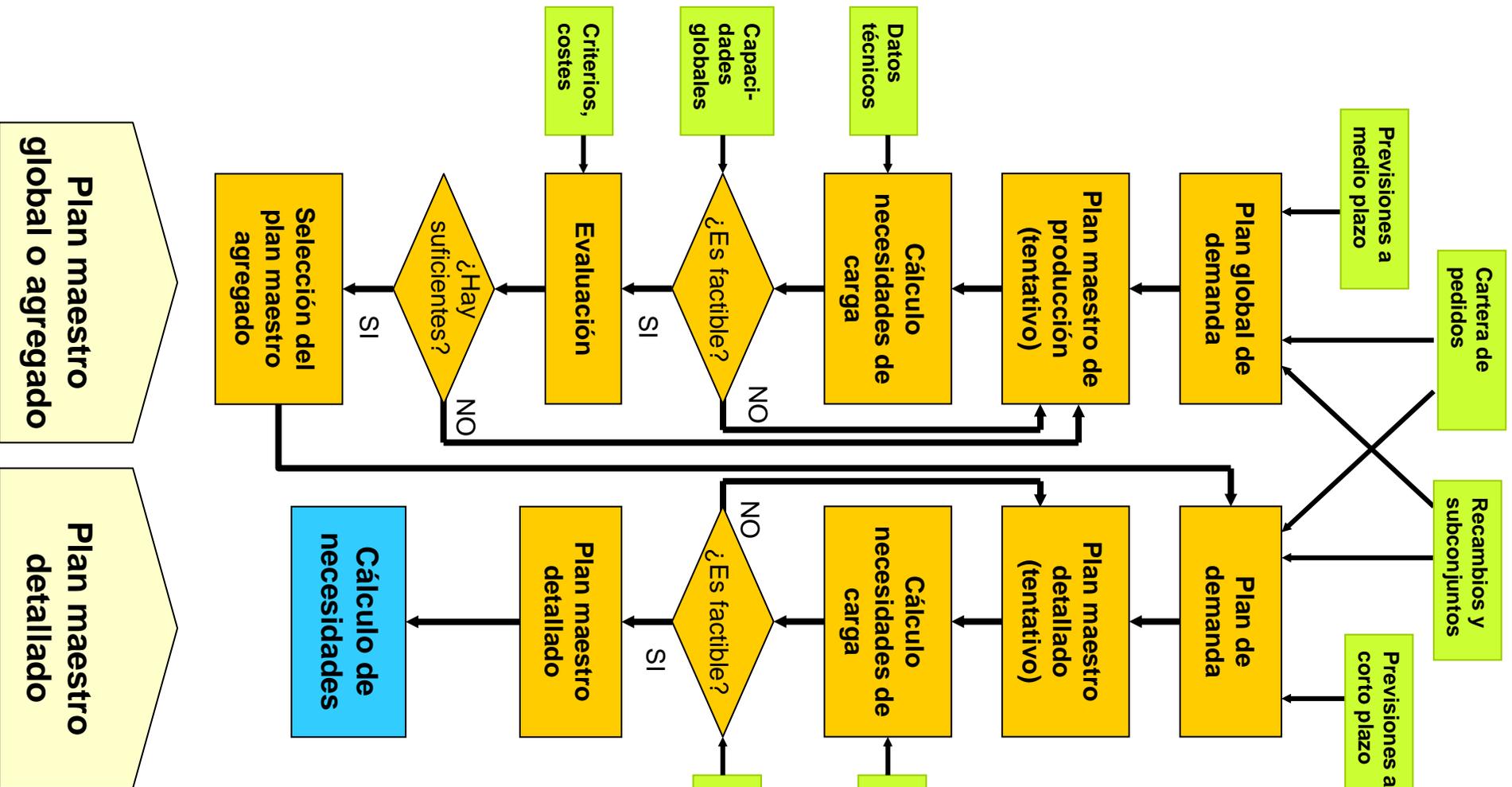


Plan maestro

	Intervalo (mes)	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	...	Mar	Abr	Total
	Días laborables	21	20	18	5	22	22	...	23	21	220
Productos	CKT 1254 J	123	135	105	25	130	140	...	120	122	1450
	CKT 1305 L	245	265	220	45	245	260	...	250	255	2930
	SLK 102 H	135	120	95	20	142	125	...	110	160	1420
	PRT 1036 IK	40	45	30	5	42	50	...	35	40	450
	CTR 206	18	23	23	0	20	24	...	16	18	210

	FGL 2306 F	225	210	190	0	255	195	...	215	230	2560
Total productos	1650	1720	1430	650	1720	1790	...	1650	1810	18960	

El proceso de planificación



Modelos para la planificación agregada

- **Intuitivos o de “prueba y error”**
 - ◆ Son los más utilizados en la práctica
- **Analíticos**
 - ◆ Basados en la programación matemática
 - ◆ Heurísticos
- **De simulación**
 - ◆ Por ordenador, en los que se prueban múltiples soluciones que se van mejorando mediante reglas de búsqueda



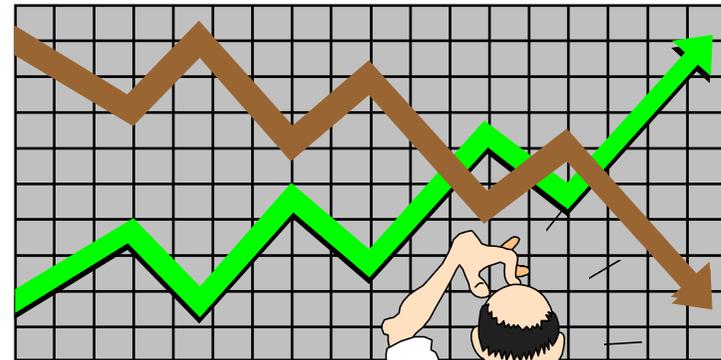
Plan maestro agregado: posibilidades de actuación

■ Actuar sobre la demanda (opción activa o agresiva)

- ◆ Promociones
- ◆ Disminuciones de precios
- ◆ Nuevos productos con ciclos de demanda complementarios
- ◆ Servir con retrasos

■ Actuar sobre la capacidad (opción reactiva o pasiva)

- ◆ Ajuste de la capacidad disponible a la necesaria
- ◆ Creación de inventarios



Aplicación de la planificación intuitiva

■ Datos:

- ◆ T periodos (meses)
- ◆ d_t → Demanda solicitada para el periodo (mes) t (comercial, previsiones, bajo pedido)
- ◆ λ_t → Días laborables en el periodo (mes) t (personal)
- ◆ σ_t → Stock ideal al final del periodo(mes) t (producción). Coef. seguridad : α
- ◆ ρ_N → Tasa de producción máxima en horas normales u/día
- ◆ ρ_E → Tasa de producción máxima en horas extra u/día
- ◆ S_o → Stock inicial (σ_o)

- ◆ C_N → Coste de producción en horas normales (um/unidad)
- ◆ C_E → Coste de producción en horas extras (um/unidad)
- ◆ C_S → Coste de exceso de stock (um/unidad-mes)
- ◆ C_R → Coste de defecto de stock (um/unidad-mes)

Aplicación de la planificación intuitiva

■ Cálculos: (demanda corregida -t-)

$$\hat{d}_t = d_t + \sigma_t - \sigma_{t-1}$$

■ Variables: (Valores a determinar)

- ◆ PHN_t : Producción en horas normales para el mes t
- ◆ PHE_t : Producción en horas extras para el mes t
- ◆ S_t : Stock al final del mes t
- ◆ S_t^+ : Exceso de stock al final del mes t
- ◆ S_t^- : Defecto de stock al final del mes t

■ Valoración económica de un Plan:

$$C_{total} = C_N \cdot \sum_{t=1}^T PHN_t + C_E \cdot \sum_{t=1}^T PHE_t + C_S \cdot \sum_{t=1}^T S_t^+ + C_R \cdot \sum_{t=1}^T S_t^-$$

Producción a tasa constante sin rotura (1/2)

- Sea R_t la tasa a la que hay que producir hasta el mes t para que no haya rupturas

$$R_t = \frac{\text{Demanda corregida hasta } t}{\text{días laborables hasta } t} \quad R_t = \frac{\hat{D}_t}{L_t} = \frac{\sum_{\tau=1}^t \hat{d}_\tau}{\sum_{\tau=1}^t \lambda_\tau}$$

- Tasa ideal: $r = \max_t \{R_t\}$

- Tasas condicionadas:

$$\begin{aligned} \text{Si } r > \rho_N + \rho_E &\rightarrow \text{No posible sin roturas} \\ \text{Si no: } r_N &= \min\{r, \rho_N\} \quad \text{Tasa para HN} \\ r_E &= r - r_N \quad \text{Tasa para HE} \end{aligned}$$

Producción a tasa constante sin rotura (2/2)

■ Producción:

$$\left. \begin{array}{l} \text{PHN}_t = \lambda_t \cdot r_N \\ \text{PHE}_t = \lambda_t \cdot r_E \end{array} \right\} P_t = \text{PHN}_t + \text{PHE}_t ; P_0 = \sigma_0 = S_0$$

■ Stock:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - d_t \quad S_0 = \sigma_0$$

$$\text{Exceso } S_t^+ = \max\{0, S_t - \sigma_t\}$$

$$\text{Defecto } S_t^- = \max\{0, \sigma_t - S_t\}$$

■ Valoración de Plan:

$$C_{\text{total}} = C_N \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHN}_t + C_E \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHE}_t + C_S \cdot \sum_{t=1}^T S_t^+ + C_R \cdot \sum_{t=1}^T S_t^-$$

Producción a tasa constante con rotura (1/2)

- Sea R la tasa promedio asociada al horizonte de planificación

$$R = \frac{\text{Demanda corregida hasta } T}{\text{días laborables hasta } T} \quad R = \frac{\hat{D}_T}{L_T} = \frac{\sum_{\tau=1}^T \hat{d}_\tau}{\sum_{\tau=1}^T \lambda_\tau}$$

- Tasa ideal: $r = R = R_T$

- Tasas condicionadas:

Si $r > \rho_N + \rho_E \rightarrow$ No posible satisfacer demanda total
Si no: $r_N = \min\{r, \rho_N\}$ Tasa para HN
 $r_E = r - r_N$ Tasa para HE

Producción a tasa constante con rotura (2/2)

■ Producción:

$$\left. \begin{array}{l} \text{PHN}_t = \lambda_t \cdot r_N \\ \text{PHE}_t = \lambda_t \cdot r_E \end{array} \right\} P_t = \text{PHN}_t + \text{PHE}_t ; P_0 = \sigma_0 = S_0$$

■ Stock:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - d_t \quad S_0 = \sigma_0$$

$$\text{Exceso } S_t^+ = \max\{0, S_t - \sigma_t\}$$

$$\text{Defecto } S_t^- = \max\{0, \sigma_t - S_t\}$$

■ Valoración de Plan:

$$C_{\text{total}} = C_N \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHN}_t + C_E \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHE}_t + C_S \cdot \sum_{t=1}^T S_t^+ + C_R \cdot \sum_{t=1}^T S_t^-$$

Producción a tasa variable sin rotura, *jit* (1/2)

- Caso extremo JIT: Sea r_t la tasa asociada al periodo t para producir sin roturas

$$r_t = \frac{\text{Demanda corregida para } t}{\text{días laborables para } t} \quad r_t = \frac{\hat{d}_t}{\lambda_t}$$

- Tasa ideal: r_t ; para $1 \leq t \leq T$

- Tasas condicionadas:

$$\begin{array}{ll} \text{Si} & r_t > \rho_N + \rho_E \rightarrow \text{No posible JIT} \\ \text{Si no:} & r_{Nt} = \min\{r_t, \rho_N\} \quad \text{Tasa para HN} \\ & r_{Et} = r_t - r_{Nt} \quad \text{Tasa para HE} \end{array}$$

Producción a tasa variable sin rotura , *jit* (2/2)

■ Producción:

$$\left. \begin{array}{l} \text{PHN}_t = \lambda_t \cdot r_{Nt} \\ \text{PHE}_t = \lambda_t \cdot r_{Et} \end{array} \right\} P_t = \text{PHN}_t + \text{PHE}_t ; P_0 = \sigma_0 = S_0$$

■ Stock:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - d_t \quad S_0 = \sigma_0$$

$$\text{Exceso } S_t^+ = \max\{0, S_t - \sigma_t\}$$

$$\text{Defecto } S_t^- = \max\{0, \sigma_t - S_t\}$$

■ Valoración de Plan:

$$C_{\text{total}} = C_N \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHN}_t + C_E \cdot \sum_{t=1}^T \text{PHE}_t + C_S \cdot \sum_{t=1}^T S_t^+ + C_R \cdot \sum_{t=1}^T S_t^-$$

Planificación intuitiva. Ejemplo (I)

Mes	Días labor.	Demanda
ENE	20	500
FEB	20	1.000
MAR	22	1.500
ABR	21	2.100
MAY	21	1.800
JUN	20	600

- ◆ Tasa producción máxima en horas normales: 50 u/día.
- ◆ Tasa producción máxima en horas extra: 20 u/día.
- ◆ Coste producción en hora normal: 200 um/u.
- ◆ Coste producción en hora extra: 300 um/u.
- ◆ Coste exceso de stock: 30 um/u-mes.
- ◆ Coste defecto de stock: 90 um/u-mes.
- ◆ Stock inicial: 120 u.
- ◆ Stock ideal, coeficiente de seguridad: $\alpha=10\%$ de demanda mensual prevista.

Planificación intuitiva. Ejemplo (II)

Demanda corregida

- ◆ Determinación de la demanda corregida y de posibles tasas para construir planes de producción:

Mes	Días lab.	D.Lab. acum.	Demanda	Stock ideal	Demanda corregida	Demanda cor. acum.	R(t)	r(t)
		0		120		0		
ENE	20	20	500	50	430	430	21,5	21,5
FEB	20	40	1000	100	1050	1480	37	52,5
MAR	22	62	1500	150	1550	3030	48,87	70,45
ABR	21	83	2100	210	2160	5190	62,53	102,85
MAY	21	104	1800	180	1770	6960	66,92	84,29
JUN	20	124	600	60	480	7440	60	24
	124		7500		7440			

Planificación intuitiva. Ejemplo (III)

Producción a tasa constante sin roturas ($r=66,92$ u/día)

Mes	Días lab.	Demanda	Stock ideal	PHN	PHE	Stock final	Exceso stock	Defecto stock
			120			120		
ENE	20	500	50	1000	338	958	908	0
FEB	20	1000	100	1000	338	1296	1196	0
MAR	22	1500	150	1100	373	1269	1119	0
ABR	21	2100	210	1050	356	575	365	0
MAY	21	1800	180	1050	356	181	1	0
JUN	20	600	60	1000	338	919	859	0
	124	7500		6200	2099		4448	0

◆ Valoración económica del plan de producción:

COSTES:	um/unidad	unidades	um
Coste producción normal (PHN):	200	6200	1.240.000
Coste producción extra (PHE):	300	2099	629.700
Coste por exceso de stock:	30	4448	133.440
Coste por defecto de stock:	90	0	0
Total:			2.003.140

Planificación intuitiva. Ejemplo (IV)

Producción a tasa constante con roturas ($r=60$ u/día)

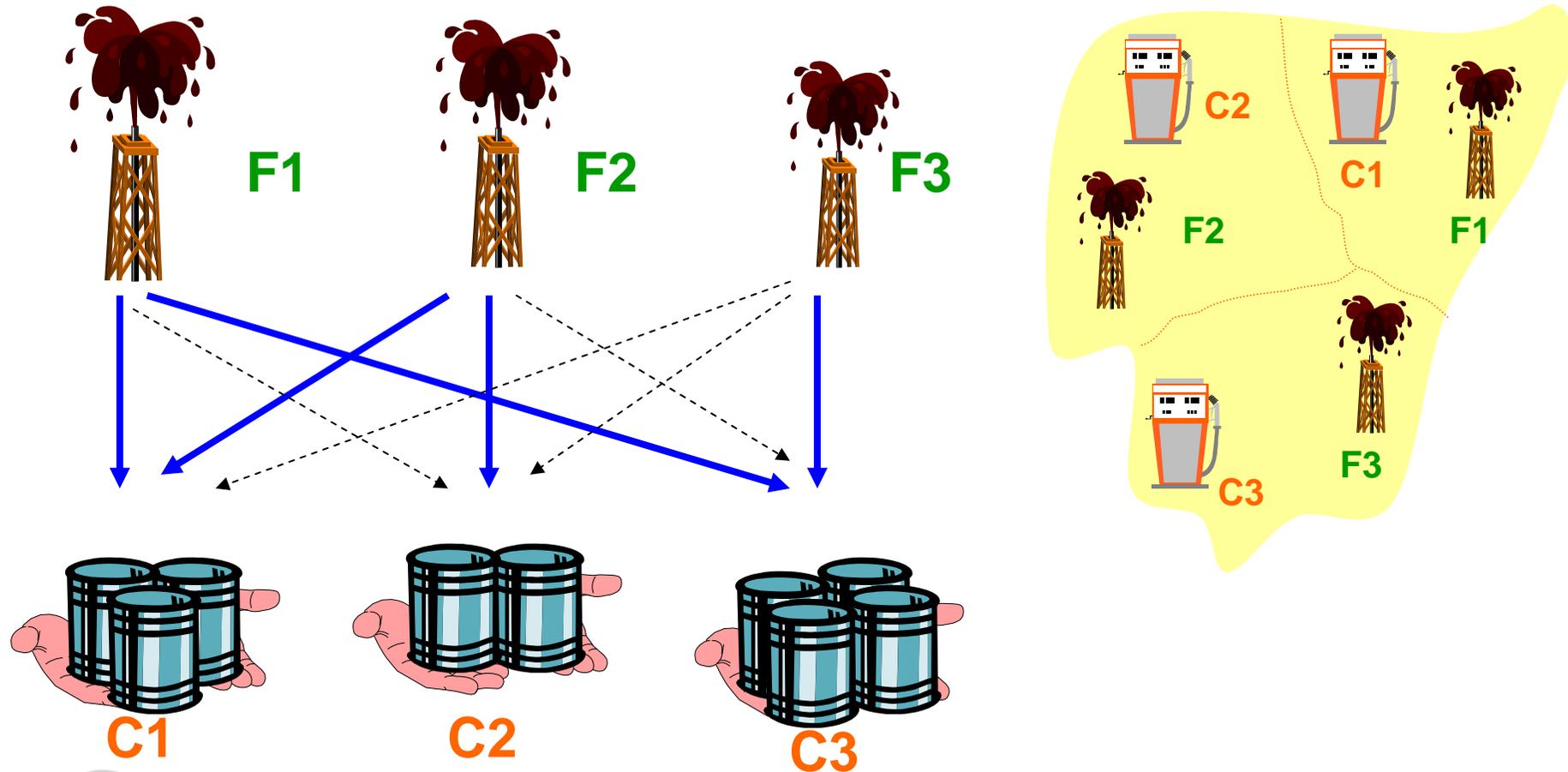
Mes	Días lab.	Demanda	Stock ideal	PHN	PHE	Stock final	Exceso stock	Defecto stock
			120			120		
ENE	20	500	50	1000	200	820	770	0
FEB	20	1000	100	1000	200	1020	920	0
MAR	22	1500	150	1100	220	840	690	0
ABR	21	2100	210	1050	210	0	0	210
MAY	21	1800	180	1050	210	-540	0	720
JUN	20	600	60	1000	200	60	0	0
	124	7500		6200	1240		2380	930

◆ Valoración económica del plan de producción:

COSTES:	um/unidad	unidades	um
Coste producción normal (PHN):	200	6200	1.240.000
Coste producción extra (PHE):	300	1240	372.000
Coste por exceso de stock:	30	2380	71.400
Coste por defecto de stock:	90	930	83.700
Total:			1.767.100

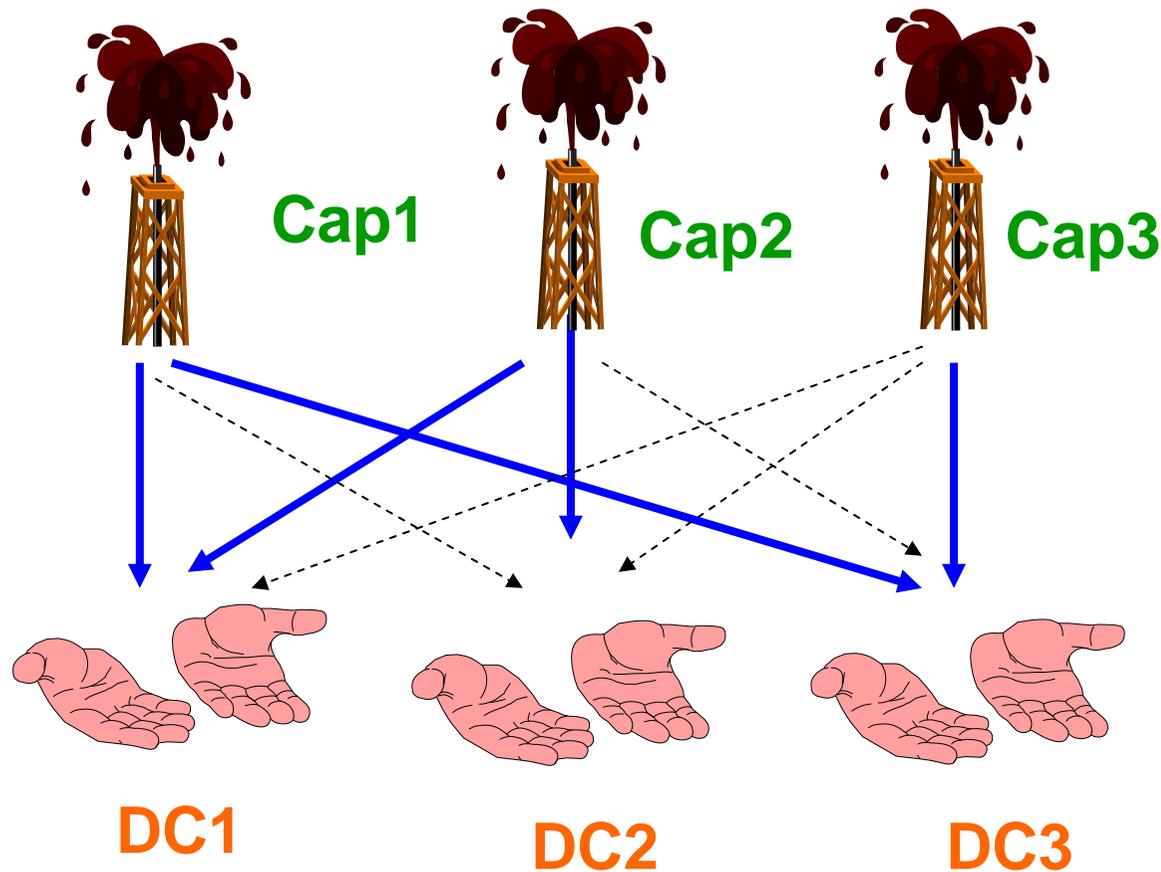
Planificación de producción óptima sin roturas (método de Bowman)

Problema del transporte



Planificación de producción óptima sin roturas (método de Bowman)

Problema del transporte aplicado a la planificación



Planificación de producción óptima sin roturas (método de Bowman)

	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN	
	1000	400	1000	400	1100	440	1050	420	1050	420	1000	400
ENE	1000	400										
	200	300										
430	430											
FEB	570	400	1000	400								
	230	330	200	300								
1050	50		1000									
MAR	520	400	0	400	1100	440						
	260	360		330	200	300						
1550	450				1100							
ABR	70	400	0	400	0	440	1050	420				
	290	390		360		330	200	300				
2160	70			180	440	1050	420					
MAY	0	400	0	220	0	0	0	0	1050	420		
		420		390					200	300		
1770		80		220					1050	420		
JUN	0	320	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	400
											200	300
480											480	
Prod	0	320	0	0	0	0	0	0	0	0	520	400
	1000	80	1000	400	1100	440	1050	420	1050	420	480	0

COSTES:			
	um/unidad	unidades	um
Coste producción normal (PHN):	200	5680	1136000
Coste producción extra (PHE):	300	1760	528000
Coste por exceso de stock:	30	2940	88200
Total:			1752200

Ejemplo.

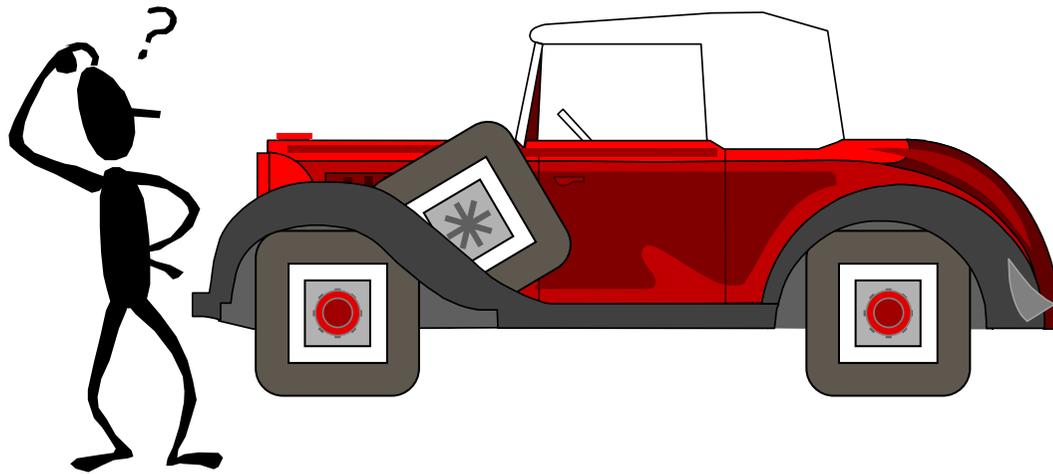
Valoraciones de los planes de producción

Método de Bowman	COSTES:	um/unidad	unidades	um
	Coste producción normal (PHN):	200	5680	1.136.000
Coste producción extra (PHE):	300	1760	528.000	
Coste por exceso de stock:	30	2940	88.200	
Total:			1.752.200	

Tasa constante con roturas	COSTES:	um/unidad	unidades	um
	Coste producción normal (PHN):	200	6200	1.240.000
Coste producción extra (PHE):	300	1240	372.000	
Coste por exceso de stock:	30	2380	71.400	
Coste por defecto de stock:	90	930	83.700	
Total:			1.767.100	

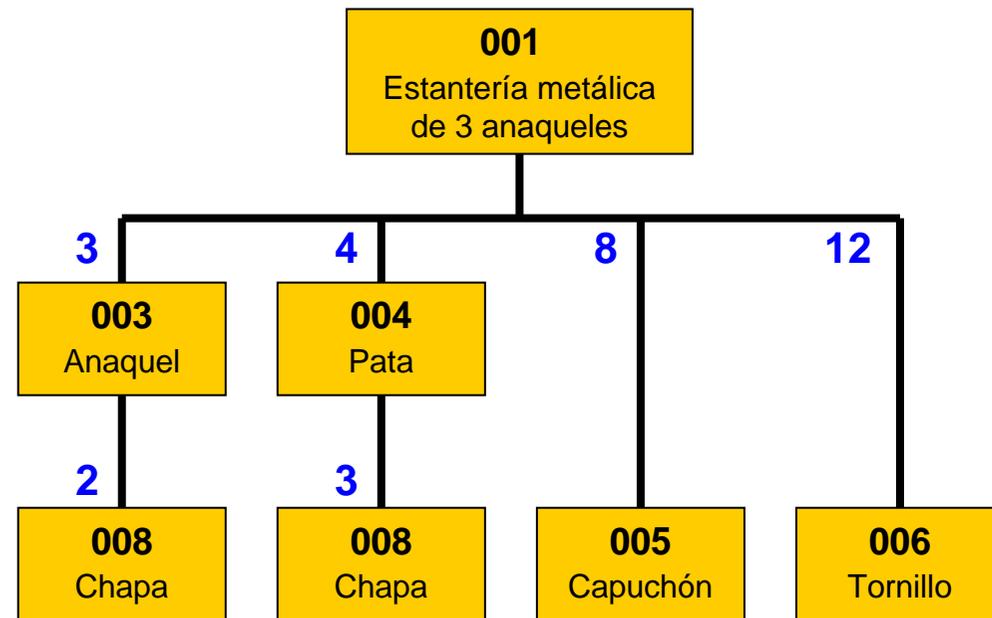
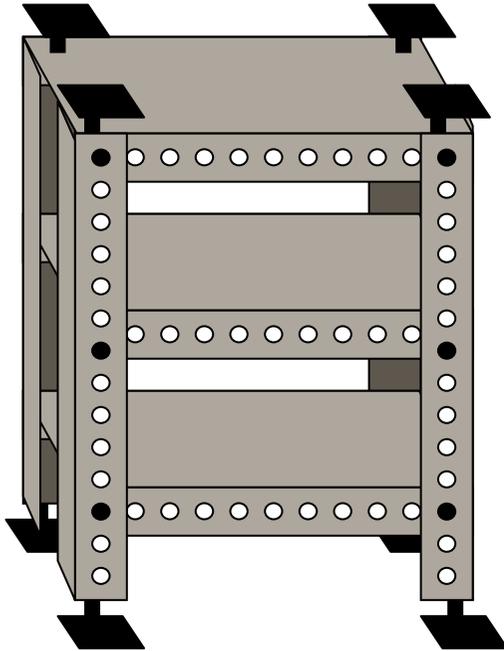
Tasa constante sin roturas	COSTES:	um/unidad	unidades	um
	Coste producción normal (PHN):	200	6200	1.240.000
Coste producción extra (PHE):	300	2099	629.700	
Coste por exceso de stock:	30	4448	133.440	
Coste por defecto de stock:	90	0	0	
Total:			2.003.140	

Cálculo de necesidades

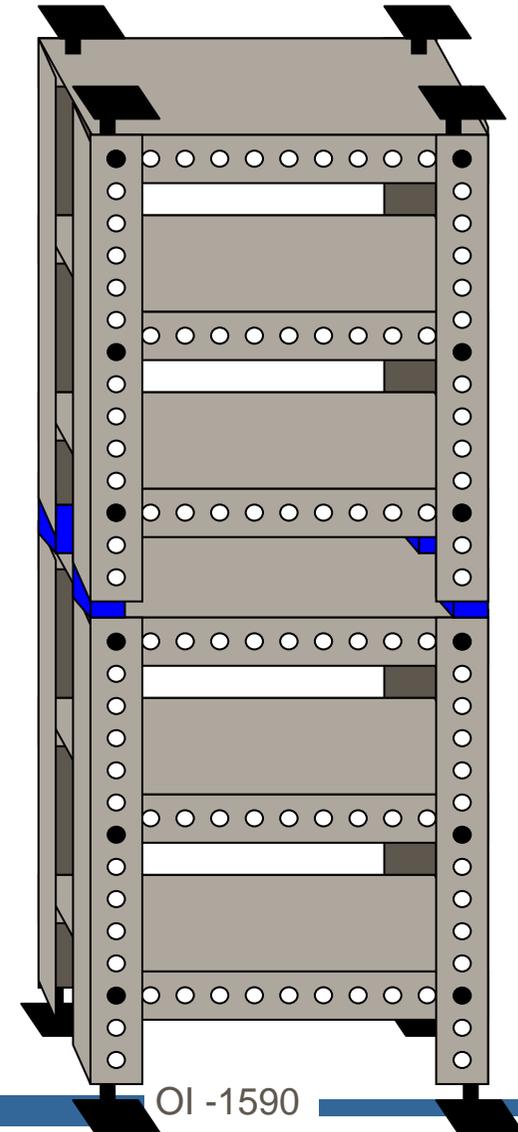
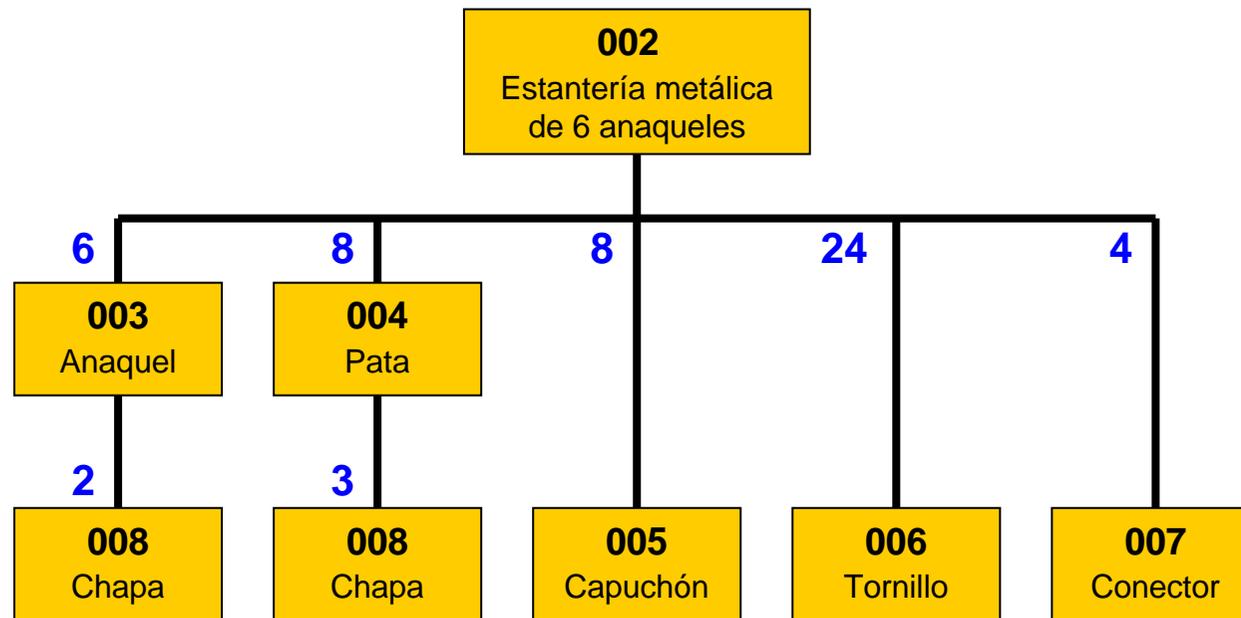


Departament
d'Organització
d'Empreses

Estantería metálica de tres anaqueles



Estantería metálica de seis anaqueles

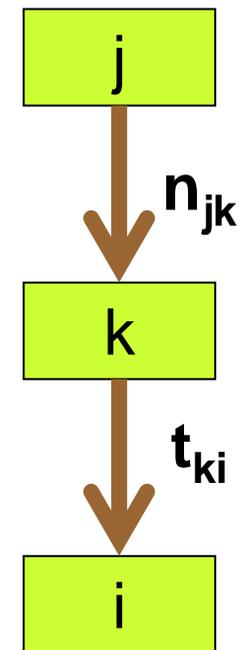


Matriz Gozinto (N)

N	001	002	003	004	005	006	007	008
001	0	0	0	0	0	0	0	0
002	0	0	0	0	0	0	0	0
003	3	6	0	0	0	0	0	0
004	4	8	0	0	0	0	0	0
005	8	8	0	0	0	0	0	0
006	12	24	0	0	0	0	0	0
007	0	4	0	0	0	0	0	0
008	0	0	2	3	0	0	0	0

Matriz de cantidades por tipo (T)

T	001	002	003	004	005	006	007	008
001	1	0	0	0	0	0	0	0
002	0	1	0	0	0	0	0	0
003	3	6	1	0	0	0	0	0
004	4	8	0	1	0	0	0	0
005	8	8	0	0	1	0	0	0
006	12	24	0	0	0	1	0	0
007	0	4	0	0	0	0	1	0
008	18	36	2	3	0	0	0	1



Cálculo de T

$$t_{ii} = 1$$

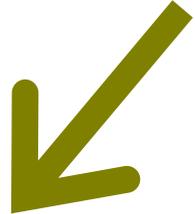
$$t_{ji} = \sum_{k=1}^m n_{jk} \cdot t_{ki} \quad \forall i \neq j$$

■ Métodos matriciales

$$T = I + T \cdot N = I + N \cdot T$$

$$T \cdot (I - N) = I \Rightarrow T = (I - N)^{-1} = I + N + N^2 + N^3 + \dots$$

Recomendado

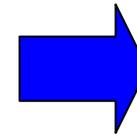


Matriz de demanda (D)

- **D: Matriz de demanda**
- **S_F: Stock deseado al final del horizonte**

D	Ene	Feb	Mar
001	600	500	400
002	400	500	600
003	0	0	0
004	0	0	0
005	0	0	0
006	0	0	0
007	0	0	0
008	0	0	0

S _F	
001	80
002	120
003	800
004	1200
005	1500
006	2000
007	500
008	5000



D;S _F	Ene	Feb	Mar	S _F
001	600	500	400	80
002	400	500	600	120
003	0	0	0	800
004	0	0	0	1200
005	0	0	0	1500
006	0	0	0	2000
007	0	0	0	500
008	0	0	0	5000

Matriz de necesidades brutas (G)

- **G: Matriz de necesidades brutas**
- **$G = T \cdot (D;S_F)$**

T	001	002	003	004	005	006	007	008
001	1	0	0	0	0	0	0	0
002	0	1	0	0	0	0	0	0
003	3	6	1	0	0	0	0	0
004	4	8	0	1	0	0	0	0
005	8	8	0	0	1	0	0	0
006	12	24	0	0	0	1	0	0
007	0	4	0	0	0	0	1	0
008	18	36	2	3	0	0	0	1

X

D;S _F	Ene	Feb	Mar	S _F
001	600	500	400	80
002	400	500	600	120
003	0	0	0	800
004	0	0	0	1200
005	0	0	0	1500
006	0	0	0	2000
007	0	0	0	500
008	0	0	0	5000

=

G	Ene	Feb	Mar	S _F
001	600	500	400	80
002	400	500	600	120
003	4200	4500	4800	1760
004	5600	6000	6400	2480
005	8000	8000	8000	3100
006	16800	18000	19200	5860
007	1600	2000	2400	980
008	25200	27000	28800	15960

Matriz de disponibilidades (A)

- S_i : Stock inicial
- E: Entregas programadas (recepciones de material)
- A: Matriz de disponibilidades ($A_1 = S_1 \oplus E_1$; $A_t = E_t$, $t > 1$)

S_i											
001	100	⊕	E	Ene	Feb	Mar	=	A	Ene	Feb	Mar
002	100		001	0	0	0		001	100	0	0
003	500		002	0	0	0		002	100	0	0
004	600		003	5000	4000	0		003	5500	4000	0
005	1000		004	6000	5000	0		004	6600	5000	0
006	1000		005	10000	10000	0		005	11000	10000	0
007	800		006	15000	15000	0		006	16000	15000	0
008	2000		007	2000	2000	0		007	2800	2000	0
			008	25000	25000	0	008	27000	25000	0	

Matriz de disponibilidad efectiva (V)

■ $V = T \cdot A$

T	001	002	003	004	005	006	007	008
001	1	0	0	0	0	0	0	0
002	0	1	0	0	0	0	0	0
003	3	6	1	0	0	0	0	0
004	4	8	0	1	0	0	0	0
005	8	8	0	0	1	0	0	0
006	12	24	0	0	0	1	0	0
007	0	4	0	0	0	0	1	0
008	18	36	2	3	0	0	0	1

X

A	Ene	Feb	Mar
001	100	0	0
002	100	0	0
003	5500	4000	0
004	6600	5000	0
005	11000	10000	0
006	16000	15000	0
007	2800	2000	0
008	27000	25000	0

=

V	Ene	Feb	Mar
001	100	0	0
002	100	0	0
003	6400	4000	0
004	7800	5000	0
005	12600	10000	0
006	19600	15000	0
007	3200	2000	0
008	63200	48000	0

Matriz de necesidades netas teóricas (W)

■ $W = G - (V; \vec{0})$

G	Ene	Feb	Mar	S _F
001	600	500	400	80
002	400	500	600	120
003	4200	4500	4800	1760
004	5600	6000	6400	2480
005	8000	8000	8000	3100
006	16800	18000	19200	5860
007	1600	2000	2400	980
008	25200	2700	28800	15960

-

V	Ene	Feb	Mar	S _F
001	100	0	0	0
002	100	0	0	0
003	6400	4000	0	0
004	7800	5000	0	0
005	12600	10000	0	0
006	19600	15000	0	0
007	3200	2000	0	0
008	63200	48000	0	0

=

W	Ene	Feb	Mar	S _F
001	500	500	400	80
002	300	500	600	120
003	-2200	500	4800	1760
004	-2200	1000	6400	2480
005	-4600	-2000	8000	3100
006	-2800	3000	19200	5860
007	-1600	0	2400	980
008	-38000	-21000	28800	15960

Matriz de necesidades netas reales (X)

$$\text{Si } \sum_{\tau=1}^t w_{i\tau} \leq 0 \Rightarrow x_{it} = 0$$

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} \sum_{\tau=1}^t w_{i\tau} > 0 \\ \sum_{\tau=1}^{t-1} w_{i\tau} < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow x_{it} = \sum_{\tau=1}^t w_{i\tau}$$

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} w_{it} > 0 \\ \sum_{\tau=1}^{t-1} w_{i\tau} > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow x_{it} = w_{it}$$

X	Ene	Feb	Mar	S _F
001	500	500	400	80
002	300	500	600	120
003	0	0	3100	1760
004	0	0	5200	2480
005	0	0	1400	3100
006	0	200	19200	5860
007	0	0	800	980
008	0	0	0	0

Matrices de cargas por tipo (B) y carga (Z)

	Artículo 1	Artículo 2	...	Artículo m
Sección 1
Sección 2
...
Sección n

B	1	2	3	4	5	6	7	8
Montaje	10	20						
Estampado			10	10				

Z	Ene	Feb	Mar	S _f
Montaje	11000	15000	16000	3200
Estampado			83000	42400

$$Z = B \cdot X$$

La carga se debe comparar con la capacidad.

Definición de MRP

El MRP I (*Material Requirements Planning*) es un sistema de planificación de la producción y de gestión de stocks que, basado en un soporte informático, responde a las preguntas qué, cuánto y cuándo se debe fabricar y/o aprovisionar

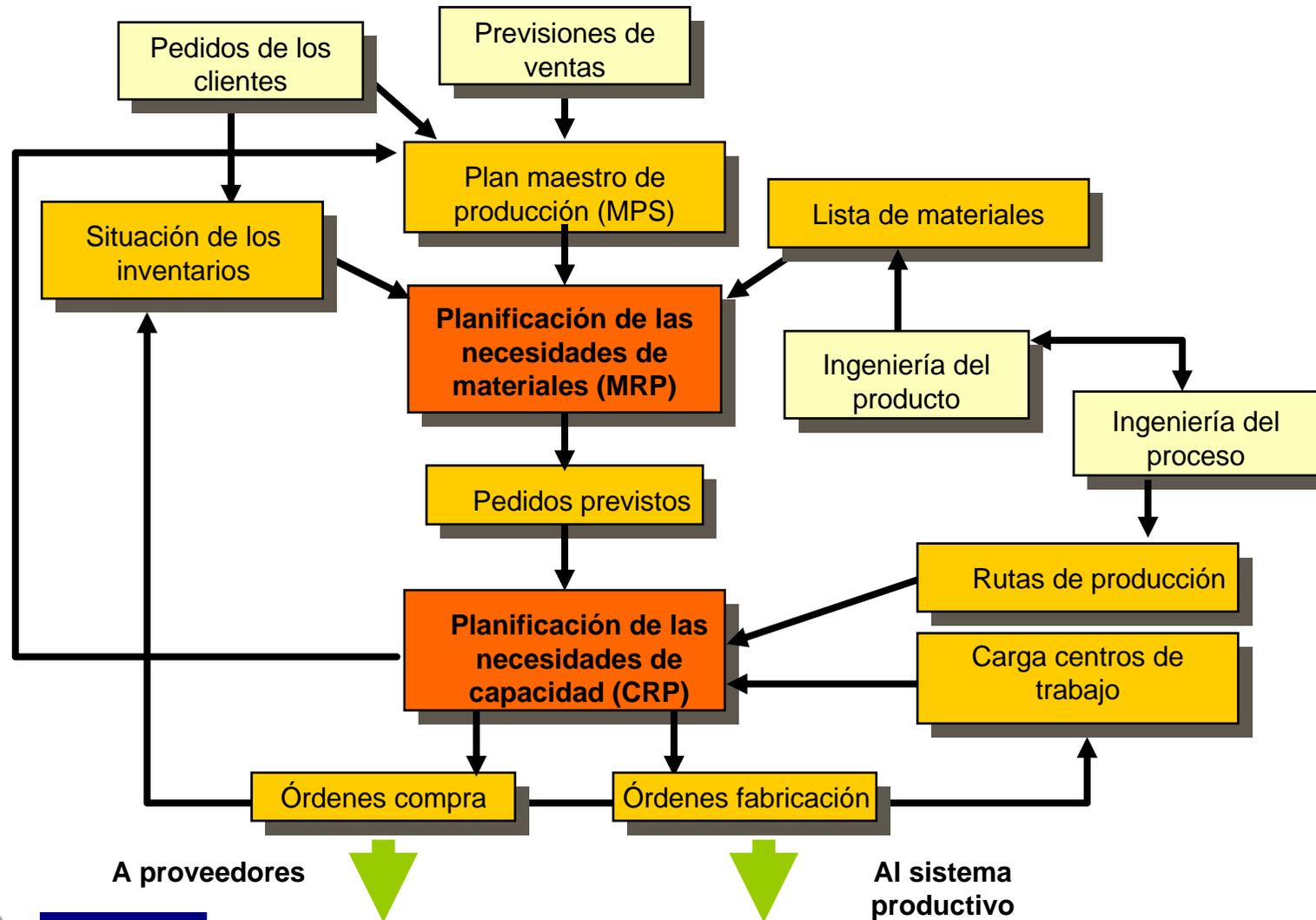
Ideas básicas:

- ◆ **La demanda de la mayoría de los artículos no es independiente, solo la de los productos con salida exterior.**
- ◆ **Las necesidades de cada artículo y cuándo deben ser satisfechas pueden calcularse a partir de datos simples: la demanda del productos de demanda independiente y la estructura del producto.**

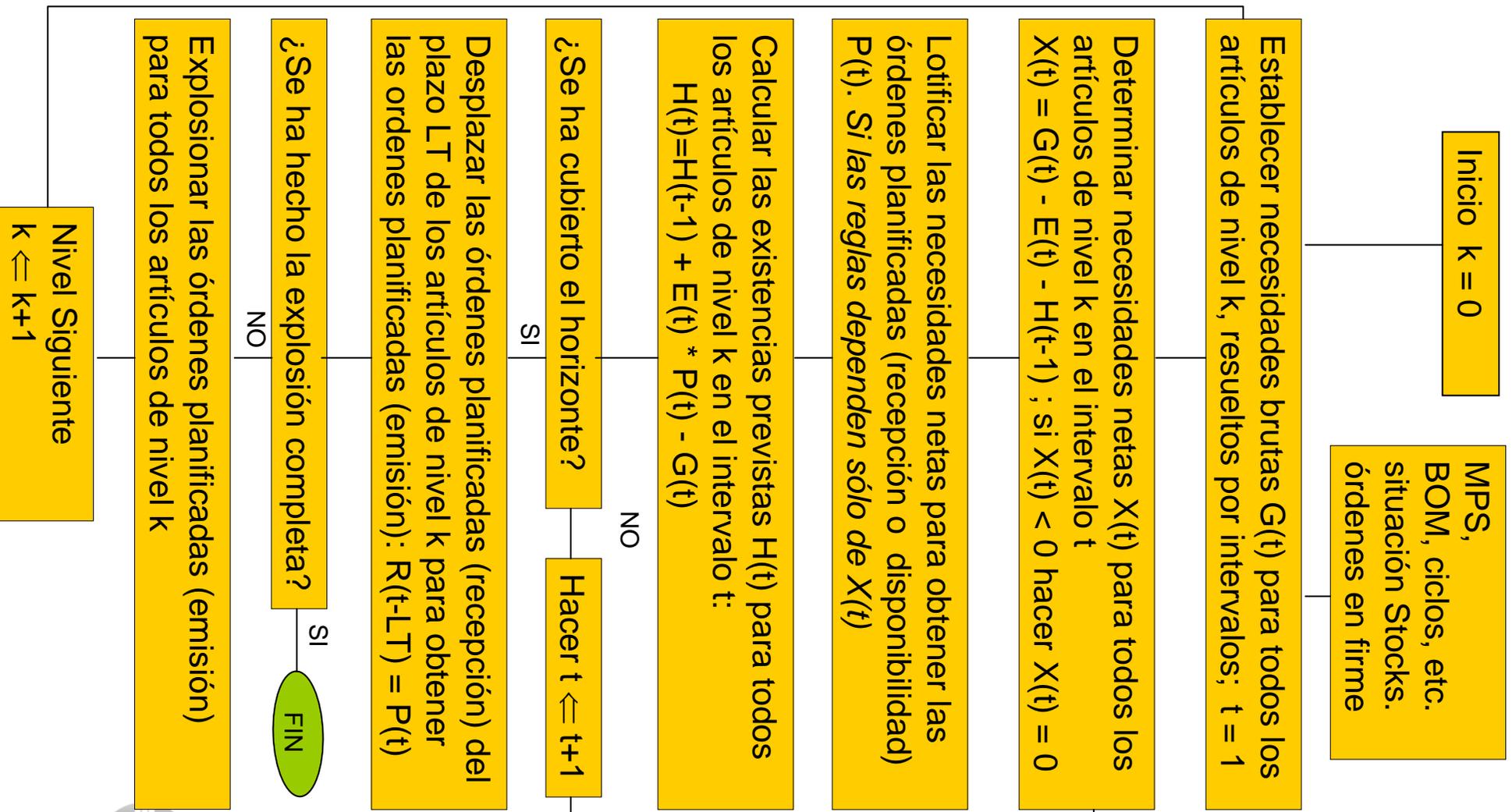
Comparación EOQ / MRP

EOQ	MRP
Orientado a cada artículo aislado	Orientado a productos componentes
Demanda independiente	Demanda dependiente (derivada)
Demanda continua	Demanda discreta (a saltos)
Salto de emisión de orden en punto de pedido	Señal de pedido temporizada
Basado en demanda histórica	Basado en producción futura
Previsión de todos los artículos	Previsión sólo de productos finales
Sistemas basados en la cantidad	Sistemas basados en cantidad-tiempo
Stock de seguridad para todos los artículos	Stock de seguridad sólo para productos acabados

Esquema MRP I

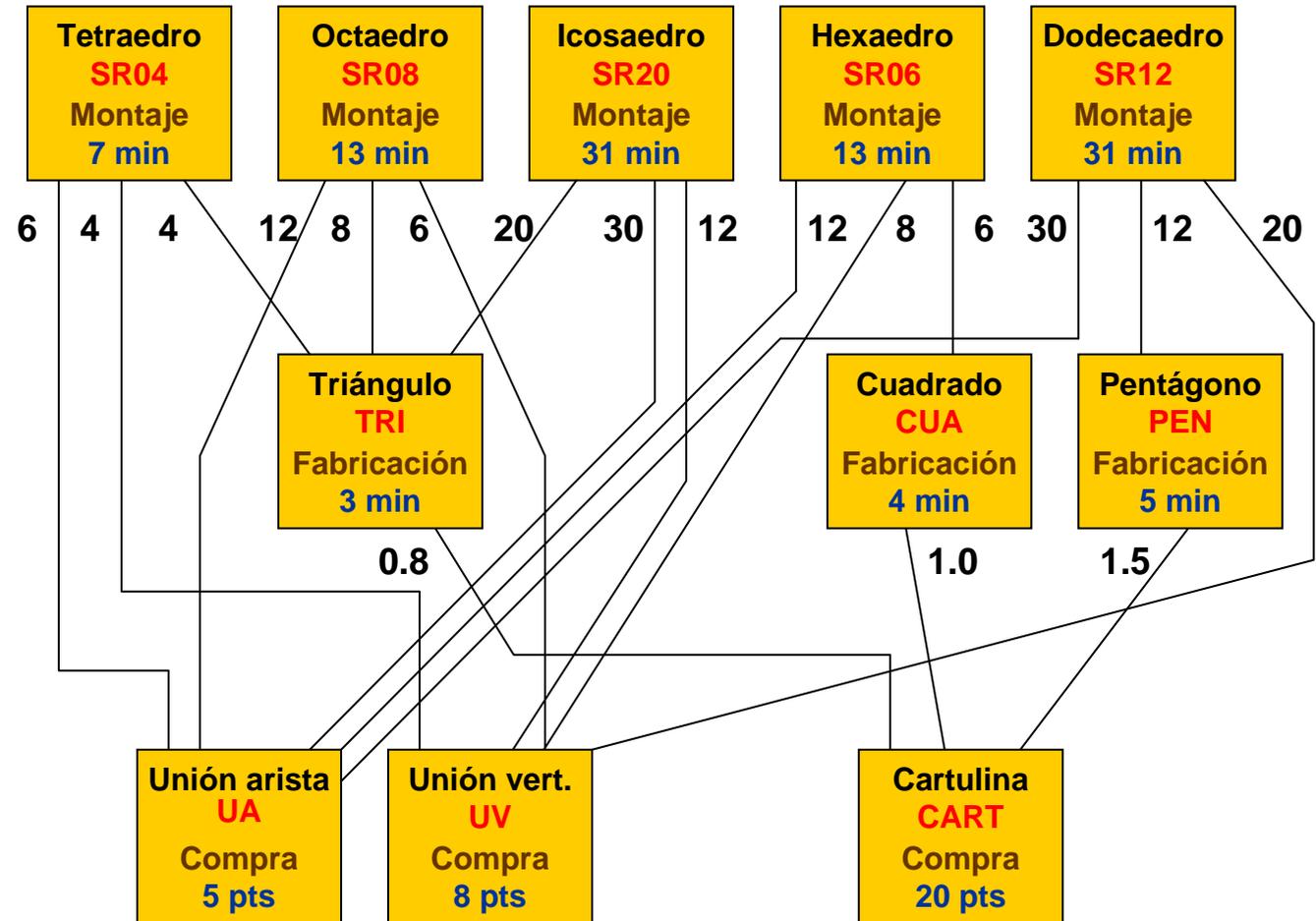


Pasos procedimiento MRP (simplificado)



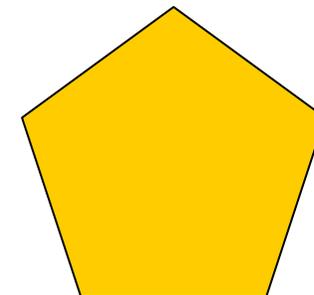
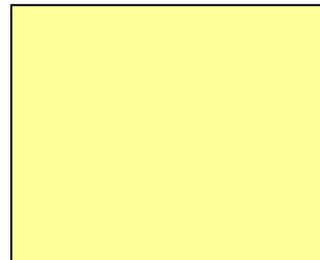
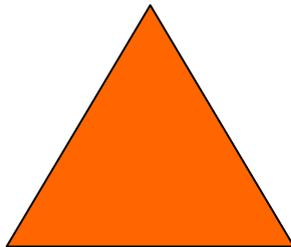
Ejemplo: Caso SOLREG

Solreg, SA fabrica cinco productos terminados correspondientes a los cinco sólidos regulares. Como materias primas utiliza *cartulina* (para fabricar los polígonos que forman las caras del sólido) y dos tipos de conexiones: las *uniones de arista* y las *uniones de vértices*.



Caso SOLREG: Estructura del producto, forma analítica

SR04	=	4xTRI	+	6xUA	+	4xUV
SR06	=	6xCUA	+	12xUA	+	8xUV
SR08	=	8xTRI	+	12xUA	+	6xUV
SR12	=	12xPEN	+	30xUA	+	20xUV
SR20	=	20xTRI	+	30xUA	+	12xUV
TRI	=	0.8xCART				
CUA	=	1xCART				
PEN	=	1.5xCART				



Caso SOLREG: Matrices N y T

	SR04	SR08	SR20	SR06	SR12	TRI	CUA	PEN
SR04								
SR08								
SR20								
SR6								
SR12								
TRI	4	8	20					
CUA				6				
PEN					12			
UA	6	12	30	12	30			
UV	4	6	12	8	20			
CART						0,8	1	1,5



Matriz N

	SR04	SR08	SR20	SR06	SR12	TRI	CUA	PEN
SR04	1							
SR08		1						
SR20			1					
SR6				1				
SR12					1			
TRI	4	8	20			1		
CUA				6			1	
PEN					12			1
UA	6	12	30	12	30			
UV	4	6	12	8	20			
CART	3,2	6,4	16	6	18	0,8	1	1,5



Matriz T

Caso SOLREG: Plan Maestro detallado y estado de stocks

	INTERVALOS								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SR04	15	15	15	15	12	13	12	13	10
SR06	10	10	10	12	12	14	15	15	15
SR08	5	5	5	5	4	4	4	3	2
SR12	4	4	4	4	4	4	4	4	4
SR20	2	2	3	3	3	4	4	4	5



Plan maestro detallado

**Estado de stock
aprovisionamientos
previstos**



	Cantidad previstas (existencias u órdenes)			
	En stock	Para (1)	Para (2)	Para (3)
SR04	40	10		
SR06	30	10		
SR08	15	5		
SR12	8	5	5	
SR20	10	3	3	
TRI	200			
CUA	50	100		
PEN	18		50	
UA	600			
UV	300			400
CART	300	700		

Caso SOLREG: Maestro de artículos

Datos de plazos y lotificación



ARTÍCULO	elaboración	plazo	tipo	Stock.Seguridad	lote
SR04	montaje	1	1	0	1
SR06	montaje	1	1	0	1
SR08	montaje	1	1	0	1
SR12	montaje	2	1	0	1
SR20	montaje	2	1	0	1
TRI	fabricación	2	3	0	300
CUA	fabricación	2	3	0	100
PEN	fabricación	2	3	0	50
UA	aprovisionamiento	3	2	0	800
UV	aprovisionamiento	3	2	0	400
CART	aprovisionamiento	4	4	50	700

- Tipo 1: No lotificación (unidad a unidad)
- Tipo 2: Lote mínimo
- Tipo 3: Lote fijo
- Tipo 4 : lote mínimo con stock de seguridad

Estadillo de cálculo MRP I

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas										
Existencias en almacén										
Pendiente de recibir										
Existencias previstas										
Necesidades netas										
Órdenes planif. (recepción)										
Órdenes planif. (emisión)										

Caso SOLREG: Cálculos MRP I. Artículo SR04

Datos de partida: necesidades, stocks y órdenes en curso

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas		15	15	15	15	12	13	12	13	10
Existencias en almacén	40									
Pendiente de recibir		10								
Existencias previstas	40	35	20	5	0	0	0	0	0	0
Necesidades netas					10	12	13	12	13	10
Órdenes planif. (recepción)					10	12	13	12	13	10
Órdenes planif. (emisión)				10	12	13	12	13	10	

Desfase por *lead time* de montaje

Lotificación (en este caso, lotes de una unidad)

Caso SOLREG: Cálculos MRP I. Artículo SR20

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas		2	2	3	3	3	4	4	4	5
Existencias en almacén	10									
Pendiente de recibir		3	3							
Existencias previstas	10	11	12	9	6	3	0	0	0	0
Necesidades netas							1	4	4	5
Órdenes planif. (recepción)							1	4	4	5
Órdenes planif. (emisión)					1(a)	4(a)	4(a)	5(a)		

(a) Desplazadas dos intervalos respecto a la disponibilidad

Caso SOLREG: órdenes planificadas (nivel 0) + necesidad caras (nivel 1)

◆ Nivel 0,
órdenes
planificadas:

	SI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
artículo SR04				10	12	13	12	13	10	
artículo SR06				2	12	14	15	15	15	
artículo SR08					4	4	4	3	2	
artículo SR12				2	4	4	4	4		
artículo SR20					1	4	4	5		

◆ Necesidad
de caras TRI,
nivel 1:

INTERVALO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
órdenes SR04x4			40	48	52	48	52	40	
órdenes SR08x8				32	32	32	24	16	
órdenes SR20x20				20	80	80	100		
TOTAL			40	100	164	160	176	56	

Caso SOLREG: Cálculo de órdenes planificadas para TRI (triángulos).

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas				40	100	164	160	176	56	
Existencias en almacén	200									
Pendiente de recibir										
Existencias previstas	200	200	200	160	60	196	36	160	104	
Necesidades netas						104		140		
Órdenes planif. (recepción)						300 ^(a)		300 ^(a)		
Órdenes planif. (emisión)				300 ^(b)		300 ^(b)				

(a) Lotes de 300 unidades

(b) Plazo de 2 intervalos entre emisión y disponibilidad

Caso SOLREG: órdenes planificadas (nivel 1) + necesidad materiales de compra (nivel 2)

◆ **Nivel 1,**
órdenes planificadas:

INTERVALO	SI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
artículo TRI				300		300				
artículo CUA				100	100		100			
artículo PEN			50	50		50				

◆ **Nivel 2**
aristas UA,
repercusiones de las
necesidades de los
niveles anteriores:

INTERVALO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
órdenes SR04 x 6			60	72	78	72	78	60	
órdenes SR06 x 12			24	144	168	180	180	180	
órdenes SR08 x 12				48	48	48	36	24	
órdenes SR12 x 30			60	120	120	120	120		
órdenes SR20 x 30				30	120	120	150		
TOTAL			144	414	534	540	564	264	

◆ **Nivel 2,**
cartulinas CART,
repercusiones de las
necesidades de los
niveles anteriores:

INTERVALO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
órdenes TRI x 0,8			240		240				
órdenes CUA x 1,0			100	100		100			
órdenes PEN x 1,5		75	75		75				
TOTAL		75	415	100	315	100			

Caso SOLREG: Cálculo de órdenes planificadas para Aristas.

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas				144	414	534	540	564	264	
Existencias en almacén	600									
Pendiente de recibir										
Existencias previstas	600	600	600	456	42	308	568	4	540	
Necesidades netas						492	232		260	
Órdenes planif. (recepción)						800 ^(a)	800 ^(a)		800 ^(a)	
Órdenes planif. (emisión)			800 ^(b)	800 ^(b)		800 ^(b)				

(a) Lotes de 800 unidades

(b) Desplazadas 3 intervalos respecto a la disponibilidad

Caso SOLREG: Cálculo de órdenes planificadas para Cartulina.

	Intervalos									
	Stock inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Necesidades brutas			75	415	100	315	100			
Existencias en almacén	300									
Pendiente de recibir		700								
Existencias previstas	250 ^(a)	950	875	460	360	45	645			
Necesidades netas							55			
Órdenes planif. (recepción)							700 ^(b)			
Órdenes planif. (emisión)			700 ^(c)							

(a) Descontamos el stock de seguridad : 50 unidades

(b) Lotes de 700 unidades

(c) Desplazadas 4 intervalos respecto a la disponibilidad

Caso SOLREG: Órdenes planificadas para los materiales de compra (nivel - 2)

Intervalos

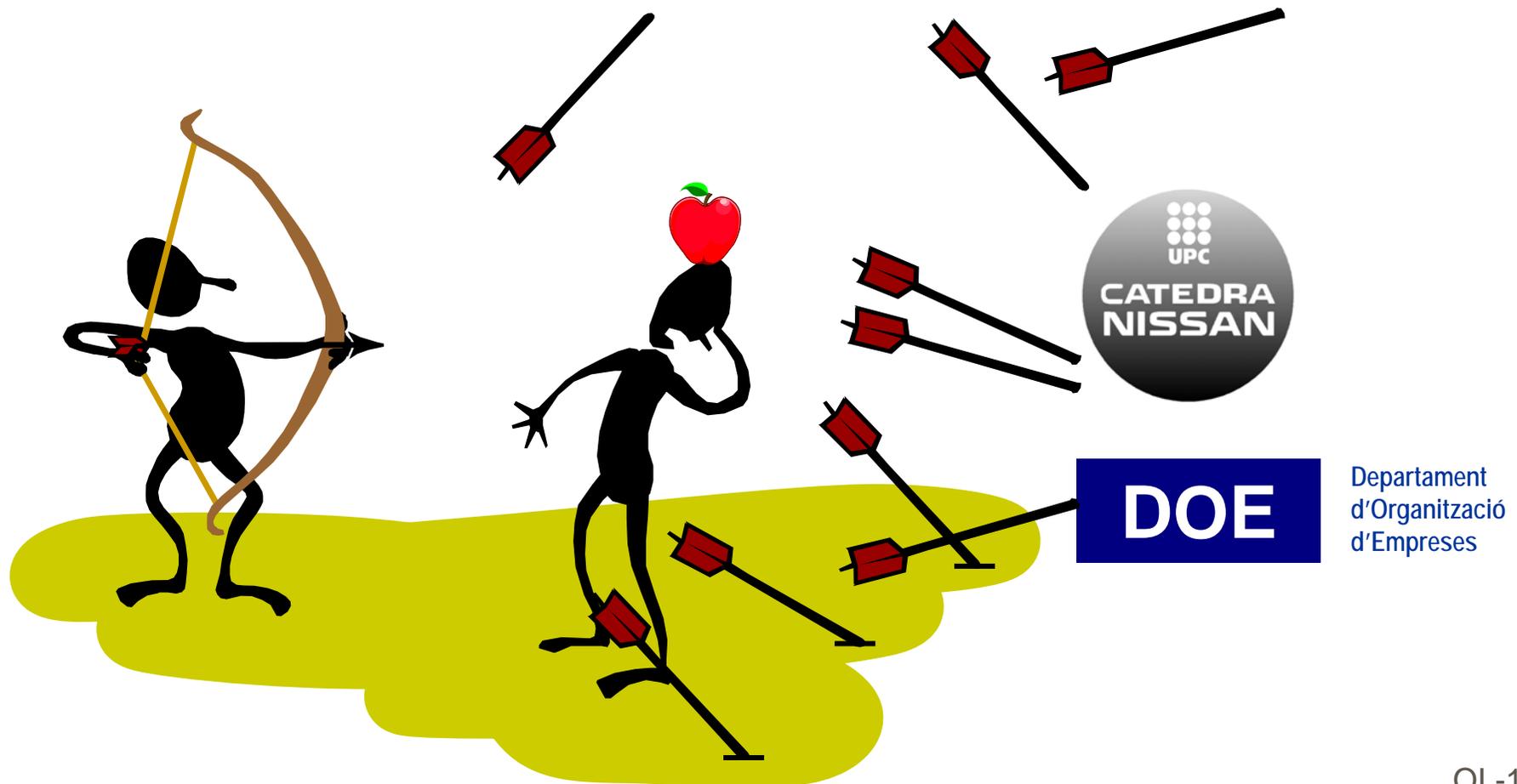
	SI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
artículo UA			800	800		800				
artículo UV				400	400					
artículo CART			700							

MRP II (*Manufacturing Resource Planning*)

Características del MRP II respecto al MRP I

- **Planificación de la capacidad (y hasta cierto punto control de la misma).**
- **Niveles de planificación definidos.**
- **Estrategia del MPS (plan maestro) estructurada y documentada, incluyendo aspectos financieros.**
- **Capacidad de simulación.**
- **Realimentación en bucle cerrado.**

Fiabilidad de sistemas



Fiabilidad de elementos y sistemas

■ Introducción y conceptos generales

■ Fiabilidad de elementos

- Ley de supervivencia
- Función de distribución de fallos. Densidad de probabilidad de fallos (densidad de averías). Tasa de averías
- Vida media de un elemento (MTBF: Tiempo medio entre fallos)

■ Leyes de supervivencia usuales

- Ley exponencial
- Ley de Weibull

■ Fiabilidad de Sistemas

- Funciones de estructura
- Redes de fiabilidad
- Funciones de fiabilidad
- Mejora de la fiabilidad: Reducción y canibalización

Concepto de Fiabilidad

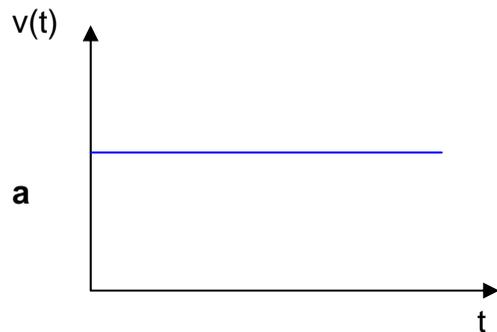
- Característica de un dispositivo expresada por la **probabilidad** de cumplir una **función** requerida bajo una serie de **condiciones** dadas y para una **duración** especificada (Comisión Electrotécnica Internacional).
- Los **resultados** corresponden a muestras de componentes o sistemas y por tanto sólo sirven para **procesos repetitivos** y **no singulares**.
- El cumplimiento de una **función** implica definir el **fallo**.
- Las **condiciones de funcionamiento** del elemento o sistema vienen definidas por el **entorno físico** (temperatura, presión, etc.) y el **factor humano**.
- La **duración** es una magnitud genérica asociada al cambio de estado que puede representar tiempo, número de ciclos, distancia recorrida, volumen de líquido, etc.

Ley de supervivencia

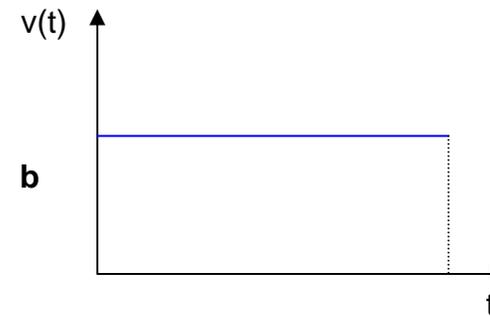
- $v(t)=\text{Prob}(T>t)$: Probabilidad de que en el instante t no se haya producido todavía la avería y por tanto el equipo esté funcionando.
- t : Magnitud de evolución de estado.
 - Tiempo
 - Ciclos
 - Distancia
 - Número de ensayos
 - etc.
- $v(t)$ es una función monótona no creciente (decreciente) que cumple:
 - $v(0) = 1$
 - $v(t)=0$ cuando $t \rightarrow \infty$

Ley de supervivencia. Funciones

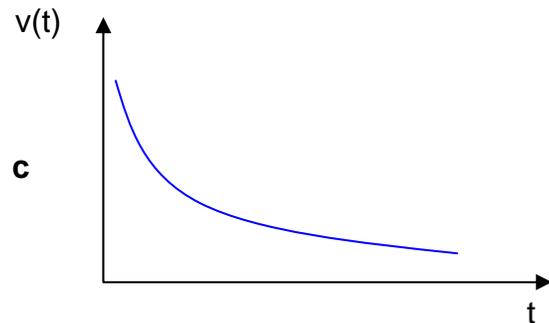
Equipo eterno



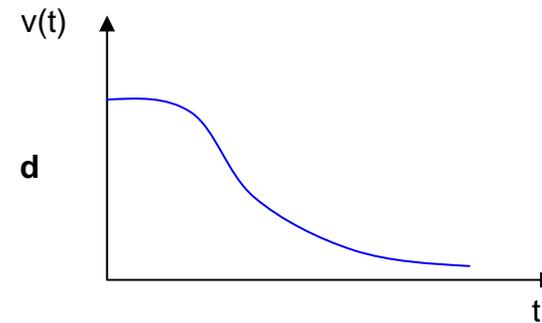
Equipo homogéneo



Equipo en fatiga



Equipo común



Ley de supervivencia. Conceptos básicos

- Función de distribución de fallos

$$F(t) = \text{Prob}(T \leq t) ; F(t) = 1 - v(t)$$

- Densidad de avería o densidad de probabilidad de fallo.

$$f(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial t} = F'(t) = -v'(t)$$

- Tasa de averías

- Caso continuo:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{v(t)} = -\frac{v'(t)}{v(t)}$$

$$-dN = \lambda(t) \cdot N \cdot dt \Rightarrow -\frac{dN}{N} = \lambda(t) \cdot dt \Rightarrow \dots \Rightarrow v(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) \cdot d\tau}$$

- Caso discreto:

$$\lambda(t) = \frac{-\Delta N(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}$$

Vida media de un elemento

- Sin reposición: el elemento se deja funcionar hasta que se produce el fallo.

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = -\int_0^{\infty} t \cdot v'(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} t \cdot v'(t) \cdot dt = \left\{ \begin{array}{l} t \rightarrow 1 \\ v'(t) \rightarrow v(t) \end{array} \right\} = \int_0^{\infty} v(t) \cdot dt$$

- Con reposición en t_0 : un elemento en funcionamiento se cambia por uno nuevo al llegar a t_0 ; si la avería se produce antes, también se substituye por uno nuevo.

$$\begin{aligned} \bar{t}(t_0) &= \bar{t}_0 = \int_0^{t_0} t \cdot f(t) \cdot dt + \int_{t_0}^{\infty} t_0 \cdot f(t) \cdot dt = \\ &= \int_0^{t_0} t \cdot f(t) \cdot dt + t_0 \cdot v(t_0) = \int_0^{t_0} v(t) \cdot dt \end{aligned}$$

Ley exponencial

■ Densidad de avería y función de distribución de fallos

$$\lambda = \text{Cte}$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

■ Vida media

- Sin reposición:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} v(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda}$$

- Con reposición:

$$\bar{t}(t_0) = \int_0^{t_0} v(t) \cdot dt = \int_0^{t_0} e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda} \cdot [1 - v(t_0)] = \frac{F(t_0)}{\lambda}$$

Ley de Weibull

■ Fiabilidad

$$v(t) = e^{-(\alpha \cdot t)^\beta}$$

■ Función de distribución de fallos

$$F(t) = 1 - e^{-(\alpha \cdot t)^\beta}$$

■ Densidad de avería

$$f(t) = -v'(t) = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot t)^{\beta-1} \cdot e^{-(\alpha \cdot t)^\beta}$$

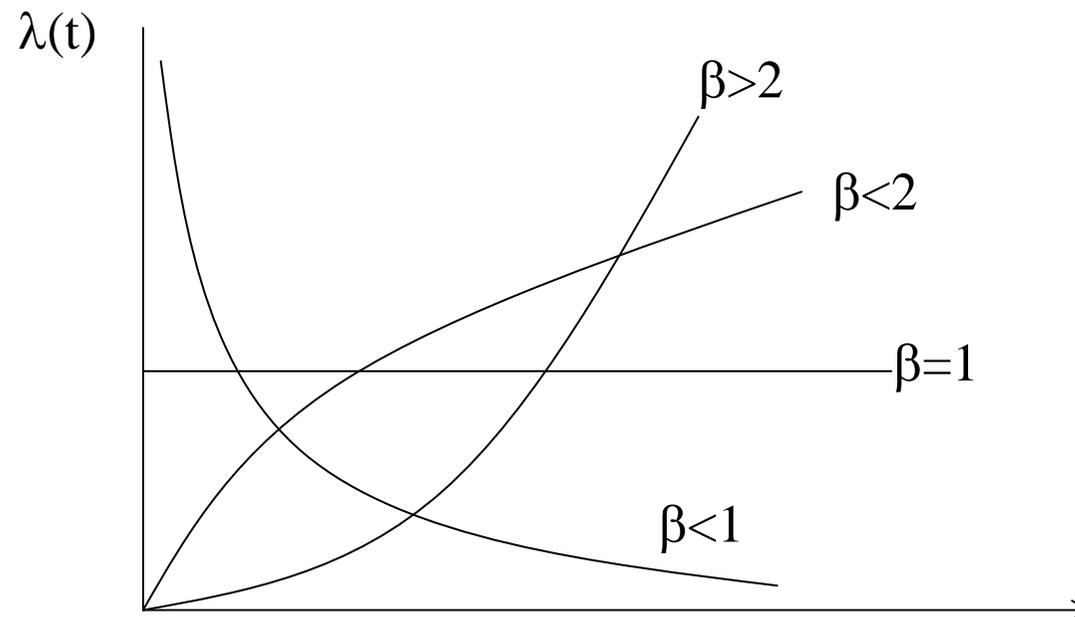
$$v'(t) = e^{-(\alpha \cdot t)^\beta} \cdot (-1) \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot t)^{\beta-1} \cdot \alpha = -\alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot t)^{\beta-1} \cdot e^{-(\alpha \cdot t)^\beta}$$

■ Tasa de averías

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{v(t)} = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot t)^{\beta-1} = \beta \cdot \alpha^\beta \cdot t^{\beta-1}$$

Ley de Weibull. Tasa de averías

- Para $\beta = 1 \rightarrow$ **Caso exponencial**
- Para $\beta < 1 \rightarrow$ **Mortalidad infantil**
- Para $\beta > 2 \rightarrow$ **Desgaste**



Ley de Weibull. Vida media

■ Vida media sin reposición

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} v(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-(\alpha \cdot t)^\beta} \cdot dt = \frac{\Gamma(1/\beta)}{\alpha \cdot \beta}$$

$$\Gamma(s) = \int_0^{\infty} e^{-u} \cdot u^{s-1} \cdot du \quad \Gamma(s) = (s-1) \cdot \Gamma(s-1)$$

$$\text{Si } s \in \mathbb{Z}^+ \quad \Gamma(s) = (s-1)!$$

$$\text{Si } s \notin \mathbb{Z}^+ \quad \Gamma(s) = (s-1) \cdot (s-2) \cdot \dots \cdot \Gamma(r); \quad \Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$$

■ Ejemplo $\beta = 2$:

$$\bar{t} = \frac{\Gamma(1/2)}{2 \cdot \alpha} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Fiabilidad de sistemas. Función de estructura

- **Función de estructura: Función booleana que representa el funcionamiento o avería de un sistema en relación al funcionamiento o fallo de sus componentes.**

$$f=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

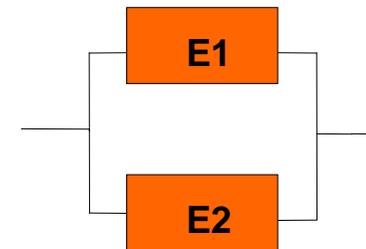
$x_i \rightarrow$ variable binaria $\begin{cases} 1 & \text{si elemento } i \text{ funciona} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$

Elementos serie



$$f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2$$

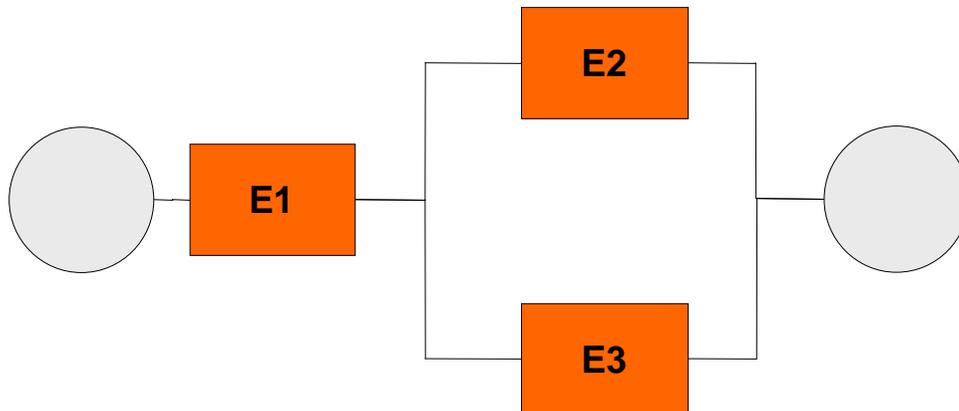
Elementos paralelo



$$f(x_1, x_2) = 1 - (1 - x_1) \cdot (1 - x_2) = x_1 + x_2 - x_1 \cdot x_2$$

Función de estructura. Ejemplo

■ Serie-paralelo

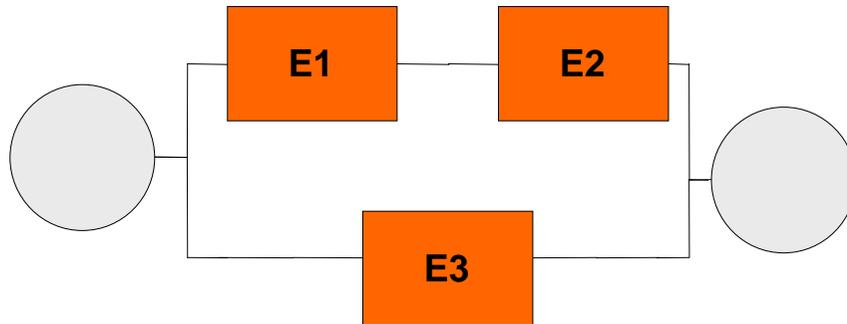


$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot (x_2 + x_3 - x_2 \cdot x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 - x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Red de Fiabilidad

- Red de fiabilidad: Representación gráfica de la función de estructura.



E1	E2	E3	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

- Funciona: (E3), (E2,E3), (E1,E3), (E1,E2), (E1,E2,E3)
- Falla : (E1,E2,E3), (E1,E3), (E2,E3)

Caminos y Cortes

- Un conjunto de elementos componentes es un **camino** si:

$$x_i = x_j = \dots x_k = 1 \Rightarrow f = 1$$

- Un **camino** es **mínimo** si no contiene otro camino con menor número de elementos.

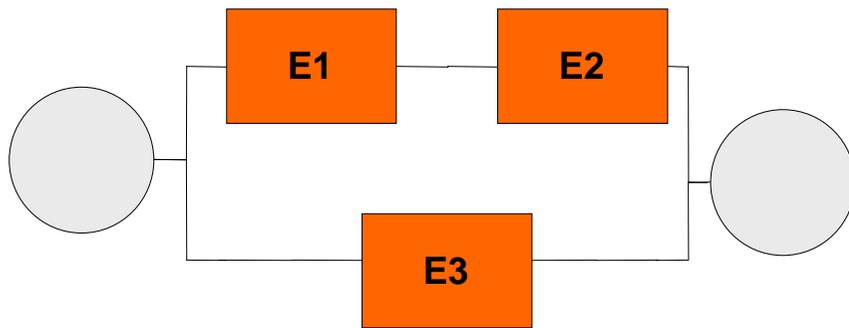
- Un conjunto de elementos componentes es un **corte** si:

$$x_r = x_s = \dots x_t = 0 \Rightarrow f = 0$$

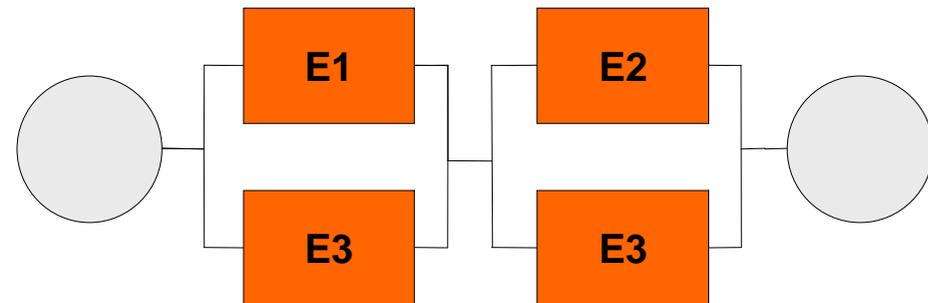
- Un **corte** es **mínimo** si no contiene otro corte con menor número de elementos.

Redes de fiabilidad equivalentes

- **Caminos:** (E3),(E2,E3),(E1,E3),(E1,E2),(E1,E2,E3) → (E3), (E1,E2)
- **Cortes** : (E1,E2,E3),(E1,E3),(E2,E3) → (E1,E3), (E2,E3)
- **Una red de fiabilidad equivalente de un sistema se construye:**
 - Poniendo en paralelo todos los caminos mínimos con sus elementos en serie
 - Poniendo en serie todos los cortes mínimos, con sus elementos en paralelo



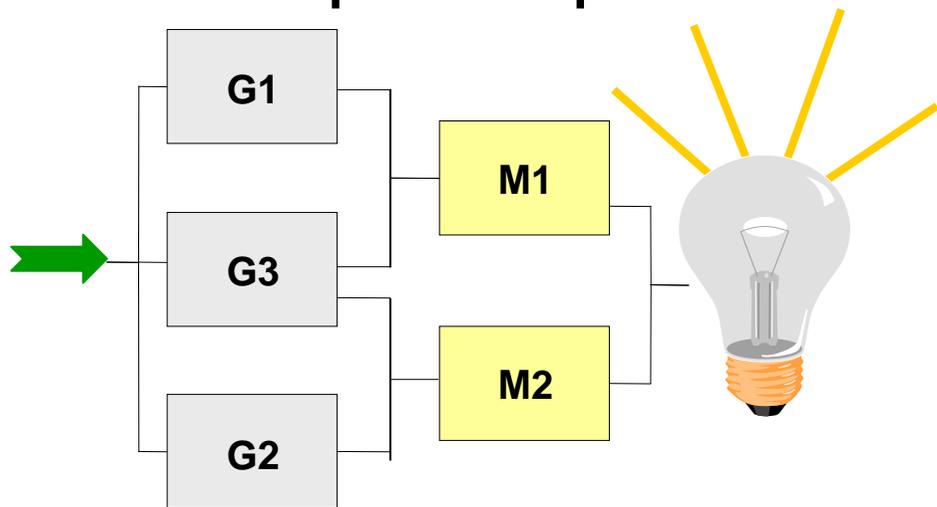
$$f=1-(1-x_1x_2)(1-x_3)$$



$$f=\{1-(1-x_1)(1-x_3)\} \{1-(1-x_2)(1-x_3)\}$$

Ejemplo 1. Red de fiabilidad (Caminos)

Tres generadores paralelo en serie con dos máquinas en paralelo:



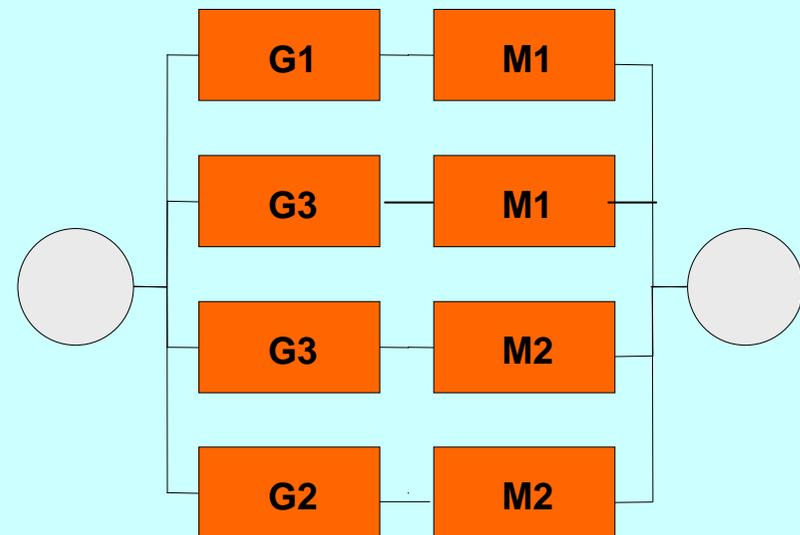
$$C_1 = G1M1$$

$$C_2 = G3M1$$

$$C_3 = G3M2$$

$$C_4 = G2M2$$

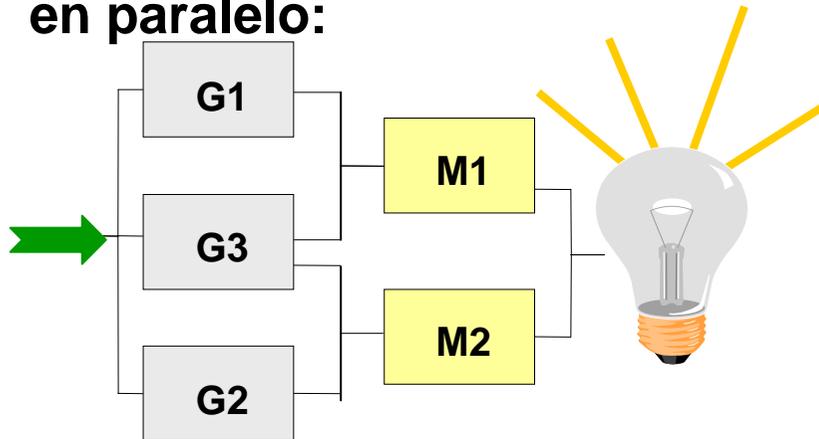
Caminos mínimos:



$$f=1-(1-g_1m_1) (1-g_3m_1) (1-g_3m_2) (1-g_2m_2)$$

Ejemplo 1. Red de fiabilidad (Cortes)

Tres generadores paralelo en serie con dos máquinas en paralelo:



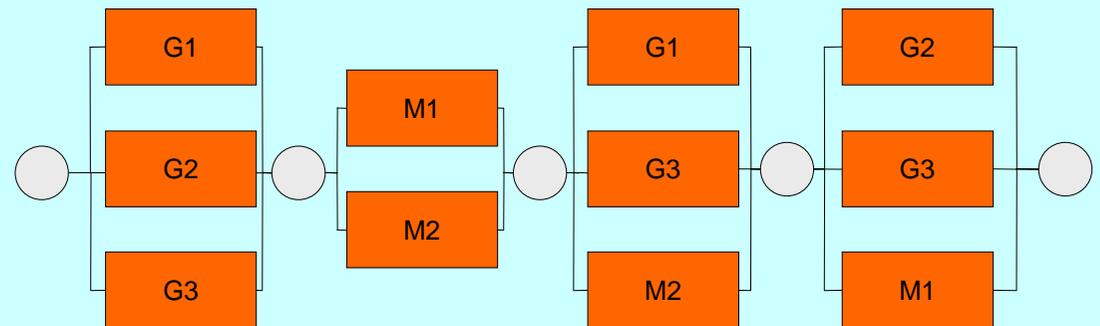
$$K_1 = G1G2G3$$

$$K_2 = M1M2$$

$$K_3 = G1G3M2$$

$$K_4 = G2G3M1$$

Cortes mínimos:



$$f = \{1-(1-g_1) (1-g_2) (1-g_3)\} \{1-(1-m_1) (1-m_2)\} \\ \{1-(1-g_1) (1-g_3) (1-m_2)\} \{1-(1-g_2) (1-g_3) (1-m_1)\}$$

Función de estructura en forma simple

- **Función de estructura en forma simple: f_s .**
Se obtiene a partir de la función de estructura (f):

- Efectuando las multiplicaciones
- Eliminando paréntesis
- Suprimiendo las potencias ($X^k=X$)
- Agrupando términos semejantes

- **Para el ejemplo 1:**

$$\begin{aligned} f = & + (g_1 m_1 + g_3 m_1 + g_3 m_2 + g_2 m_2) - \\ & - (g_1 m_1 g_3 + g_1 m_1 g_3 m_2 + g_1 m_1 g_2 m_2 + g_3 m_1 m_2 + g_3 m_1 g_2 m_2 + g_3 m_2 g_2) + \\ & + (g_1 m_1 g_3 m_2 + g_1 m_1 g_3 g_2 m_2 + g_1 m_1 g_3 m_2 g_2 + g_3 m_1 m_2 g_2) - \\ & - (g_1 m_1 g_3 m_2 g_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f = & g_1 m_1 + g_3 m_1 + g_3 m_2 + g_2 m_2 + g_1 m_1 g_3 g_2 m_2 - \\ & - (g_1 m_1 g_3 + g_1 m_1 g_2 m_2 + g_3 m_1 m_2 + g_3 m_2 g_2) \end{aligned}$$

Función de fiabilidad de un sistema (1/2)

- $h(p_1, p_2, \dots, p_n)$: Función que representa la probabilidad de funcionamiento de un sistema en función de las probabilidades de funcionamiento (p_1, p_2, \dots, p_n) de sus elementos componentes.

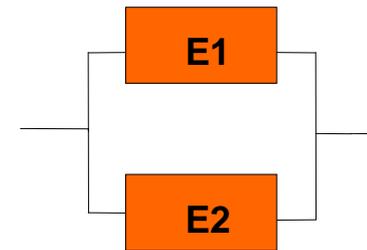
p_i = Probabilidad de funcionamiento del elemento E_i

Elementos serie



$$h(p_1, p_2) = p_1 \cdot p_2$$

Elementos paralelo



$$h(p_1, p_2) = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2$$

Función de fiabilidad de un sistema (2/2)

■ Obtención de la función de fiabilidad de un sistema $h(p_1, p_2, \dots, p_n)$:

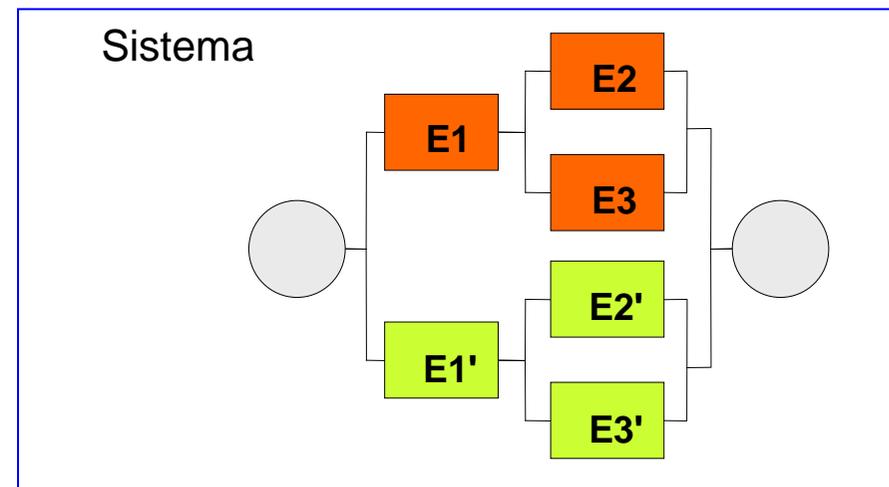
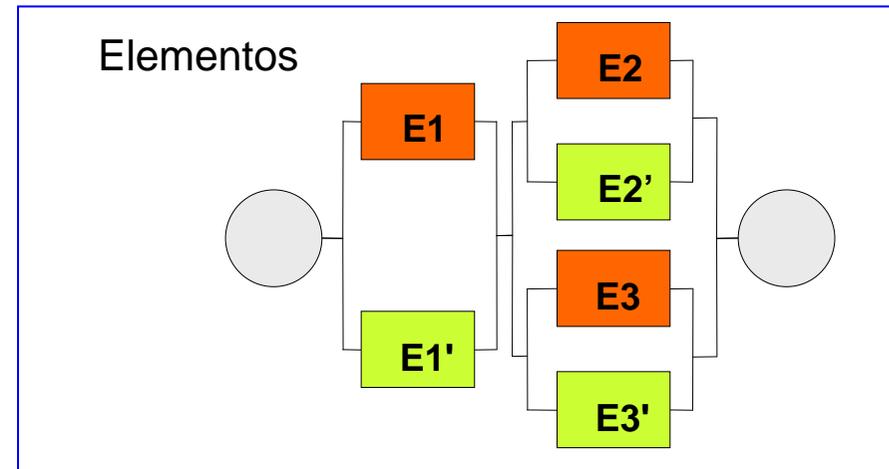
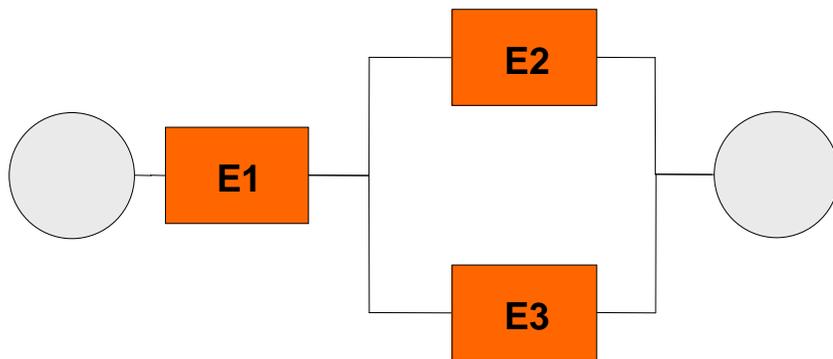
- ◆ Construir la función de estructura f del sistema.
- ◆ Obtener la función de estructura en forma simple f_s a partir de la función f .
- ◆ El desarrollo de la función $h(p_1, p_2, \dots, p_n)$ coincide con el de $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ substituyendo x_i por p_i .

■ Para el ejemplo 1:

$$\begin{aligned} h = & p(g_1) \cdot p(m_1) + p(g_3) \cdot p(m_1) + p(g_3) \cdot p(m_2) + p(g_2) \cdot p(m_2) + \\ & + p(g_1) \cdot p(m_1) \cdot p(g_3) \cdot p(g_2) \cdot p(m_2) - \\ & - p(g_1) \cdot p(m_1) \cdot p(g_3) - p(g_1) \cdot p(m_1) \cdot p(g_2) \cdot p(m_2) - \\ & - p(g_3) \cdot p(m_1) \cdot p(m_2) - p(g_3) \cdot p(m_2) \cdot p(g_2) \end{aligned}$$

Procedimientos para incrementar la fiabilidad de un sistema. Redundancia

- **Redundancia: Disponer varios ejemplares de un mismo elemento en paralelo y requerir que sólo uno de ellos esté en funcionamiento.**

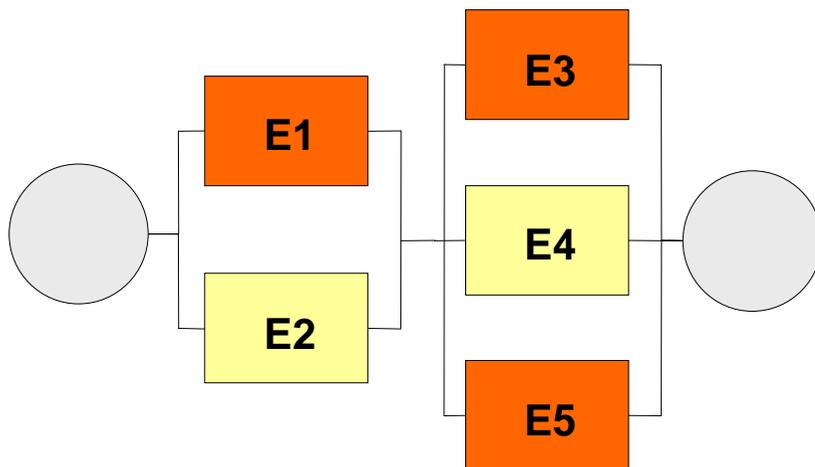


Procedimientos para incrementar la fiabilidad de un sistema. Canibalización

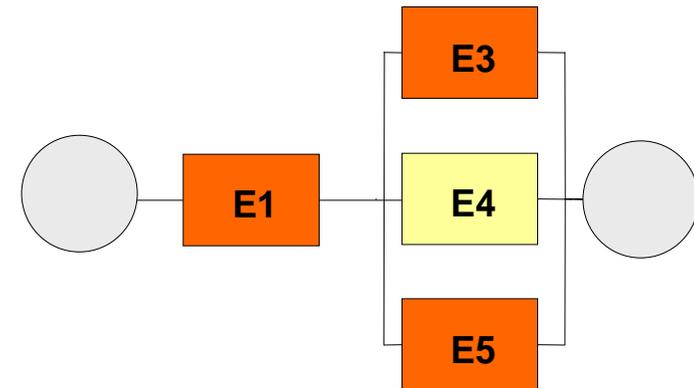
- **Canibalización: Intercambiar elementos de un mismo tipo cuando uno de ellos falla.**

Tipo I : E1,E3,E5

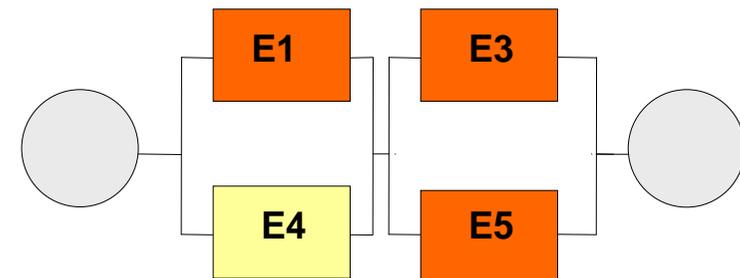
Tipo II : E2,E4



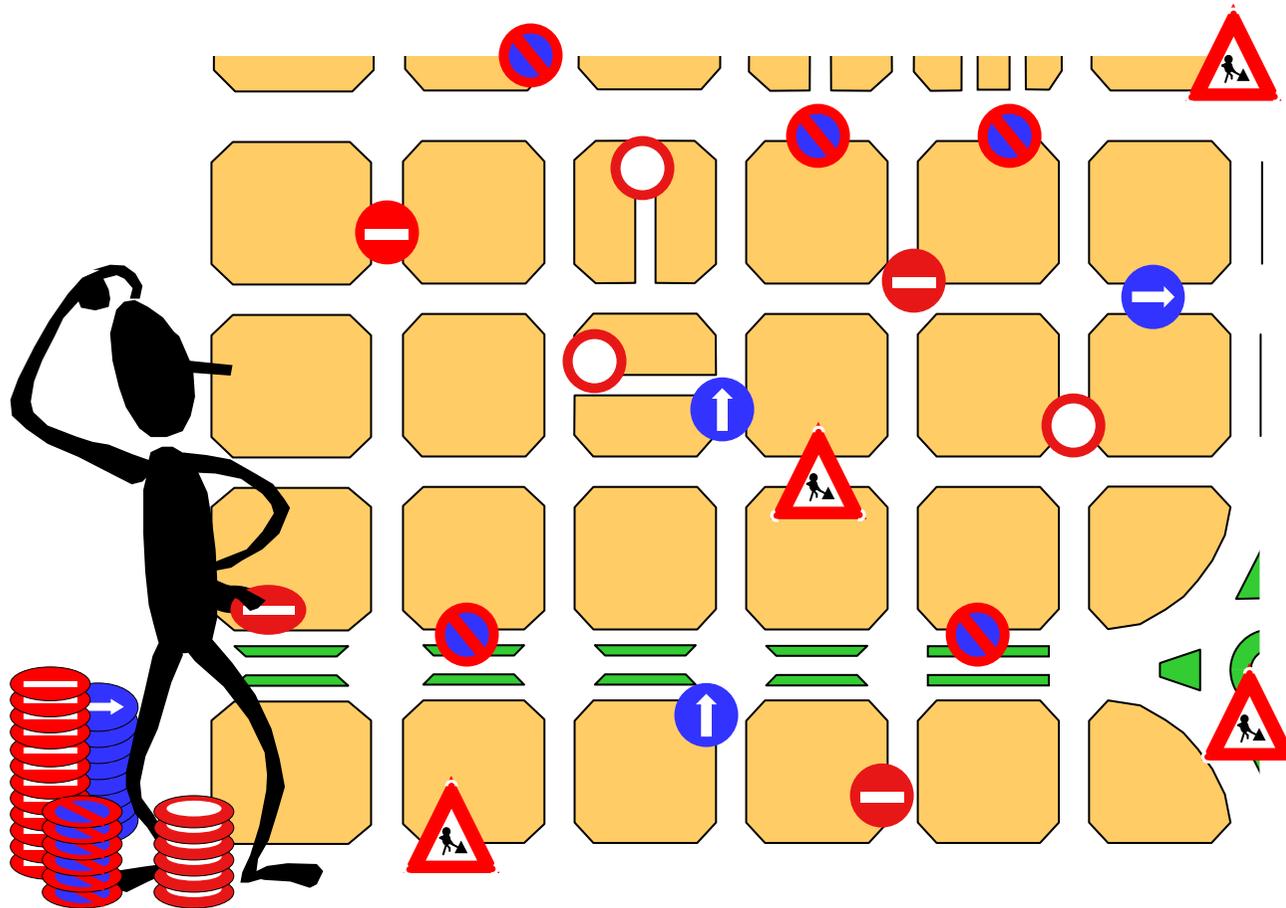
Falla E2



Falla E2 y se substituye por E4



Localización



Departament
d'Organització
d'Empreses

Localización de sistemas productivos

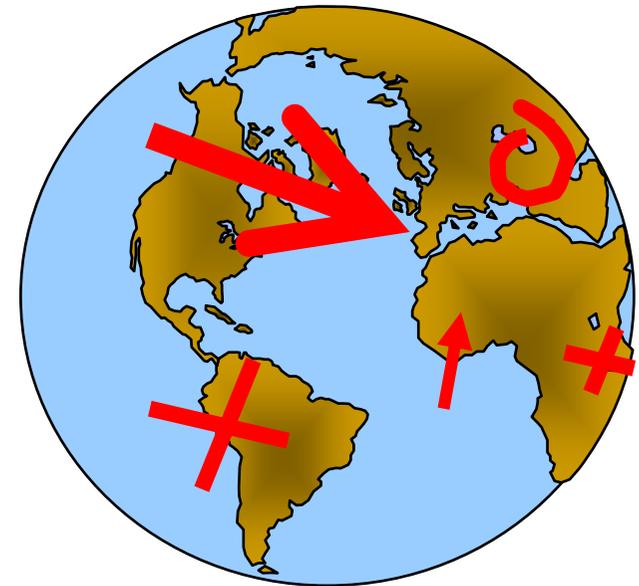
- **La localización es una decisión clave en el diseño del sistema productivo. Significa responder a la pregunta ¿cuál es el mejor emplazamiento para el sistema?**

- **Es una decisión**

- ◆ Multicriterio
- ◆ Jerarquizada

- **Admite multitud de clasificaciones**

- ◆ Manufactura - servicios
- ◆ Según el tipo de instalación
- ◆ Espacio continuo - discreto
- ◆ Una instalación - múltiples instalaciones (con o sin interacción)
- ◆ Según la estructura de la red de comunicaciones (distancia rectangular, euclídea, definida por un grafo,...)

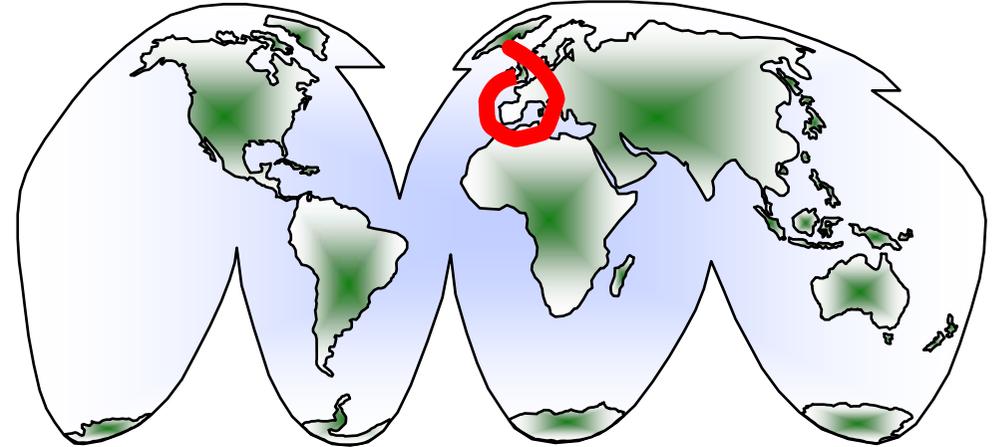


Ejemplos de problemas de localización

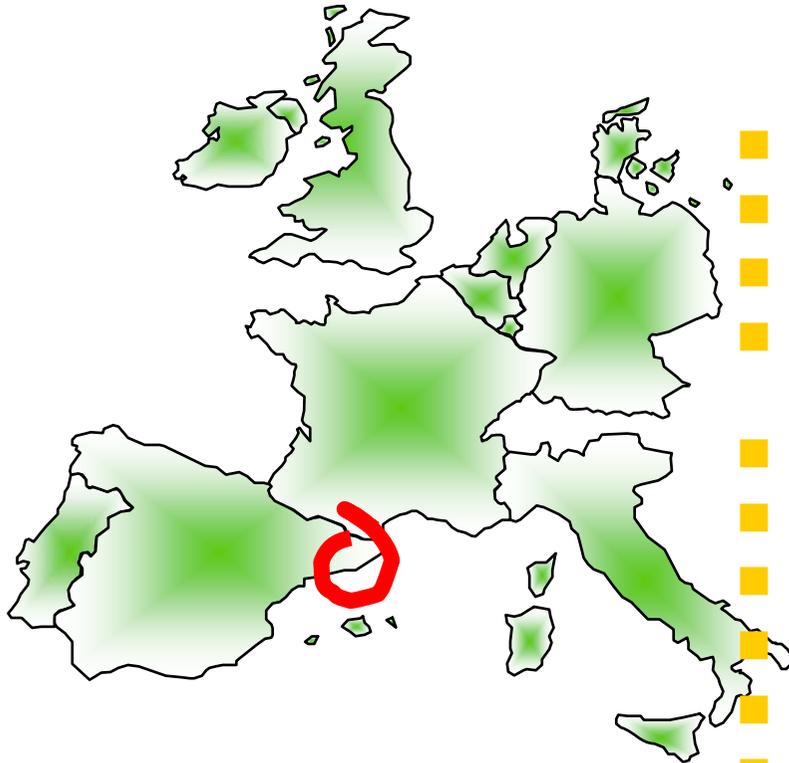
- **Central térmica**
- **Planta incineradora de residuos urbanos**
- **Zona de actividades logísticas (ZAL)**
- **Parque de atracciones**
- **Almacén de distribución**
- **Tercera pista de un aeropuerto**
- **Estación del TAV**
- **Biblioteca en un campus universitario**
- **Comisaría de policía**
- **Columna de destilación en una instalación química**
- **Mercado municipal**
- **Grúa fija en una obra de construcción**
- **Parada de autobús a lo largo de la línea**
- **Salida de emergencia en un edificio**
- **Fotocopiadora en un departamento administrativo**
- **Indicador de alarma en un panel de control**
- **Máquina expendedora de tabaco en un bar**
- **Tecla de escape en un ordenador**

Criterios para elegir el país o área

- Estructura de las comunicaciones
- Medios de transporte
- Convertibilidad de la moneda
- Impuestos, tasas y aranceles
- Disponibilidad y coste de la mano de obra
- Estabilidad política, económica, monetaria,...
- Posibilidad de conflictos bélicos
- Posibilidad de repatriación de beneficios y capital
- Disponibilidad y coste de los recursos naturales
- Discriminación hacia empresas extranjeras
- Incentivos a la inversión o a la implantación industrial
- Sindicatos



Criterios para elegir la región

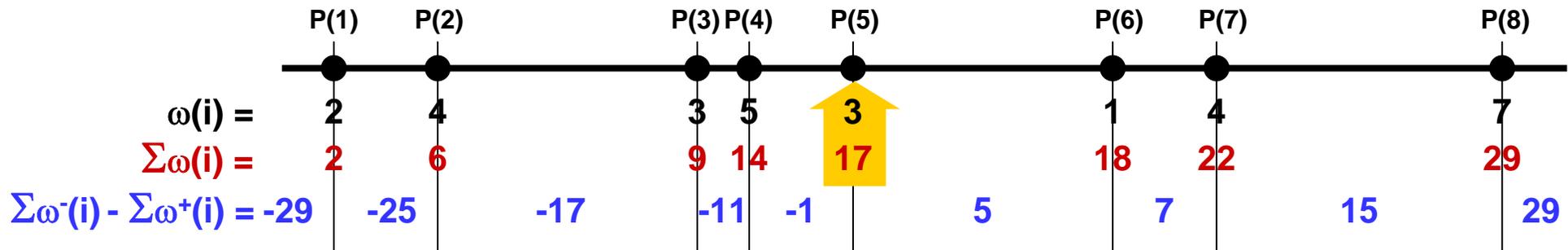


- Accesibilidad a las fuentes de materias primas
- Disponibilidad de mano de obra y salarios
- Clima
- Presencia de núcleos con alta densidad de población
- Transporte y comunicaciones
- Proximidad de un puerto marítimo o un aeropuerto
- Fiscalidad
- Disponibilidad y coste de la energía
- Servicios, estructura del sector terciario
- Presencia en la región de industrias afines

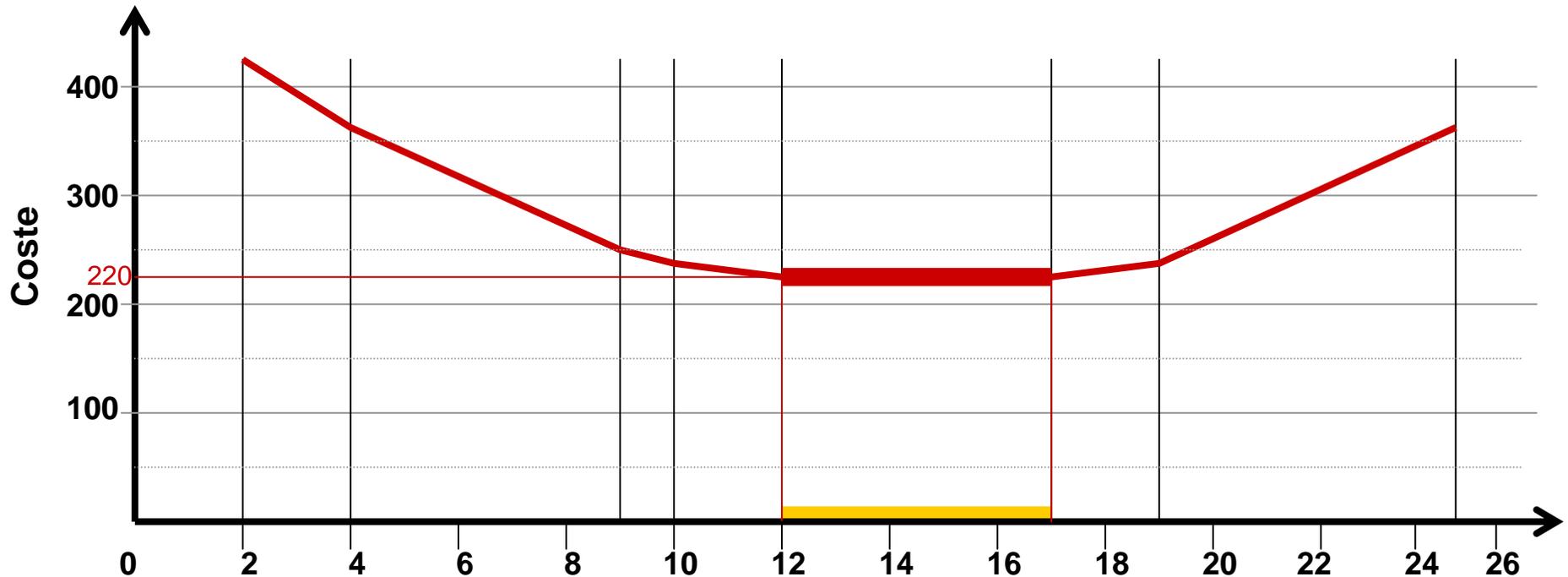
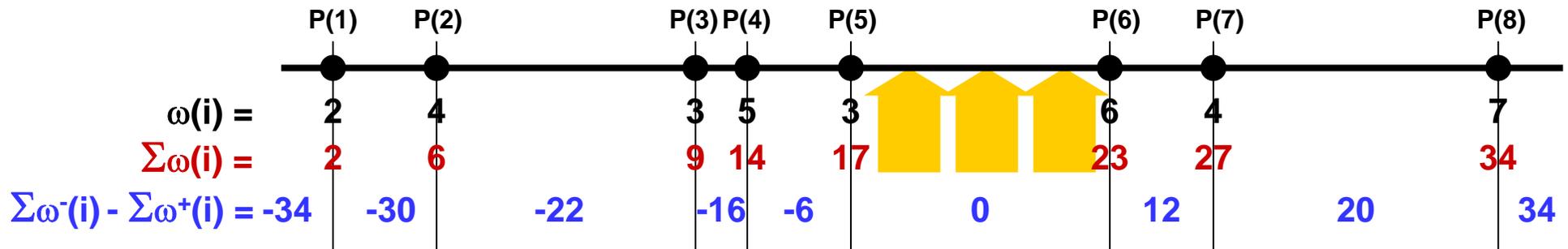
Criterios para elegir emplazamiento

- **Actitud de la comunidad**
- **Posibilidad de deshacerse de desechos**
- **Espacio (disponibilidad y coste) para expansión**
- **Proximidad de determinados servicios (centros escolares, universidades, mercados,...)**
- **Nivel salarial**
- **Políticas locales, tasas, impuestos, etc.**
- **Topografía de la zona**
- **Medios de transporte y coste de estos**
- **Disponibilidad de viviendas y coste de las mismas**
- **Suministro de servicios (energía, agua, combustible,...)**
- **Posibilidad de conservar mano de obra actual**
- **Disponibilidad de mano de obra cualificada**
- **Proximidad a instalaciones preexistentes**
- **Experiencias favorables en instalaciones semejantes**

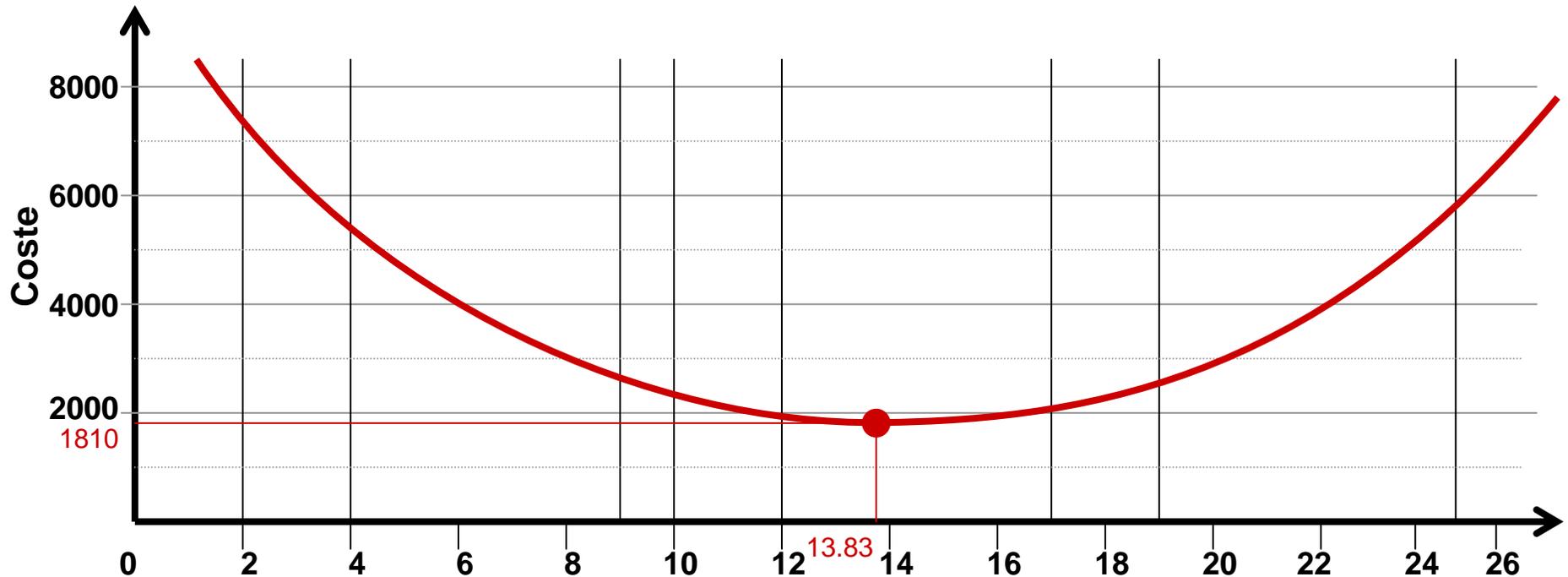
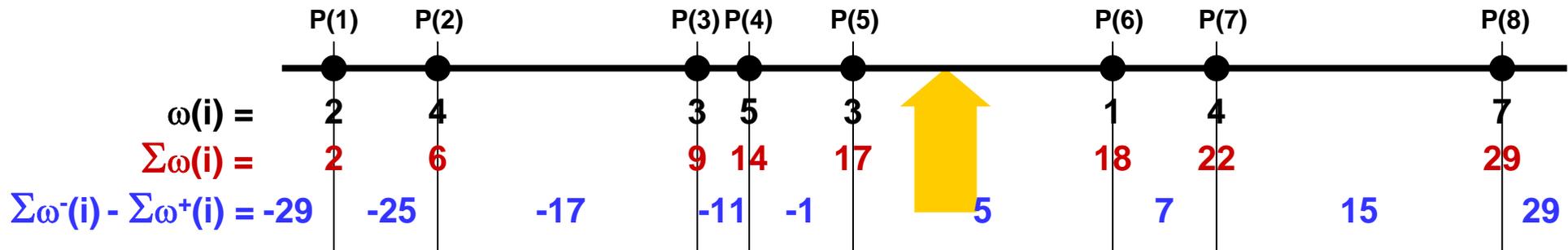
Localización unidimensional



Localización unidimensional, óptimo múltiple



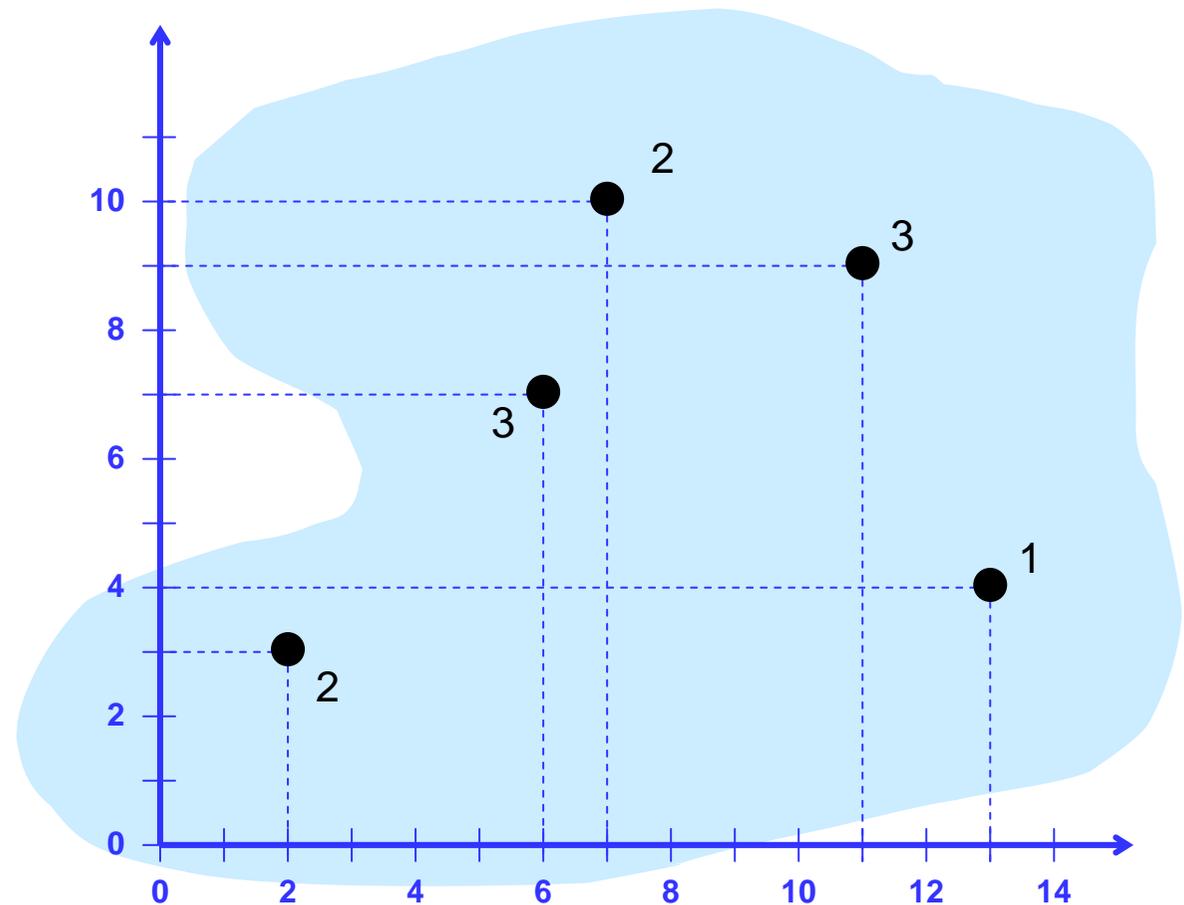
Localización unidimensional, distancia cuadrática



Problemas de localización bidimensionales

- Distancia rectangular
- Distancia cuadrática
- Distancia euclídea

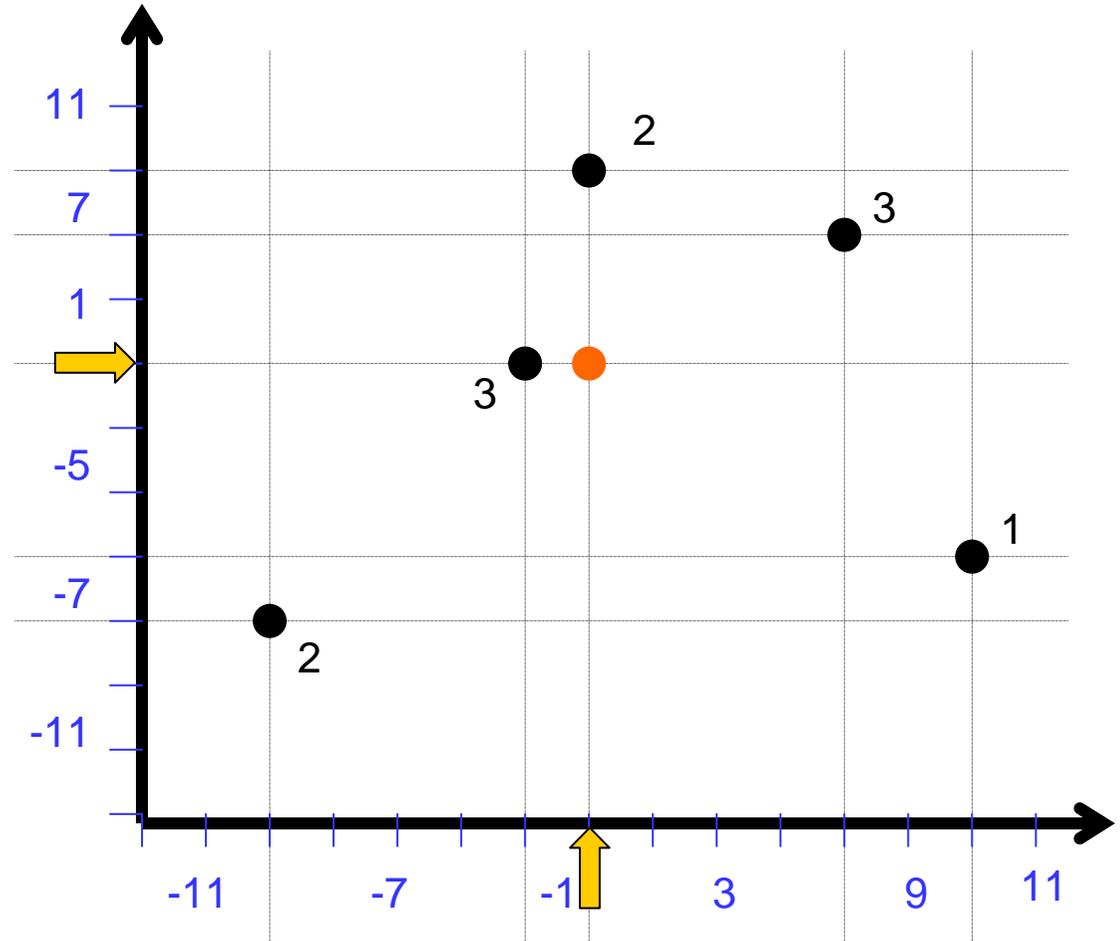
- Sin restricciones
- Con restricciones



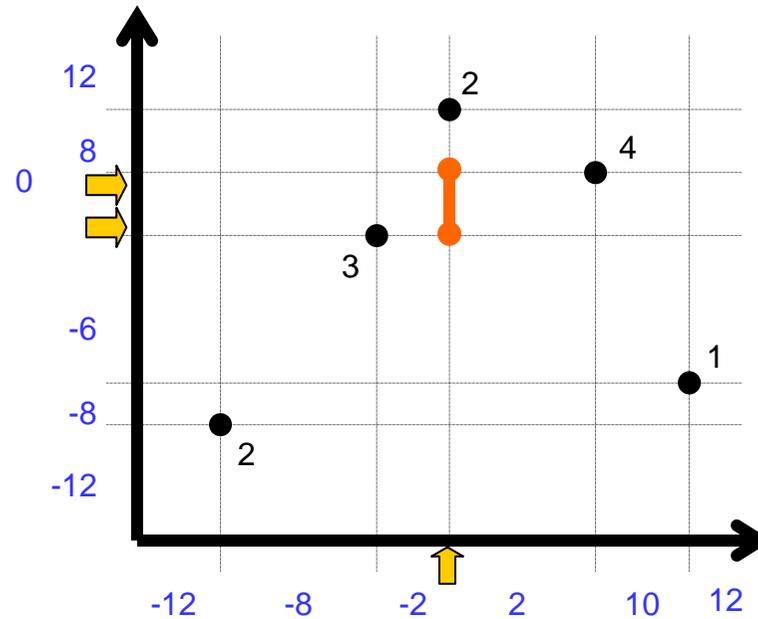
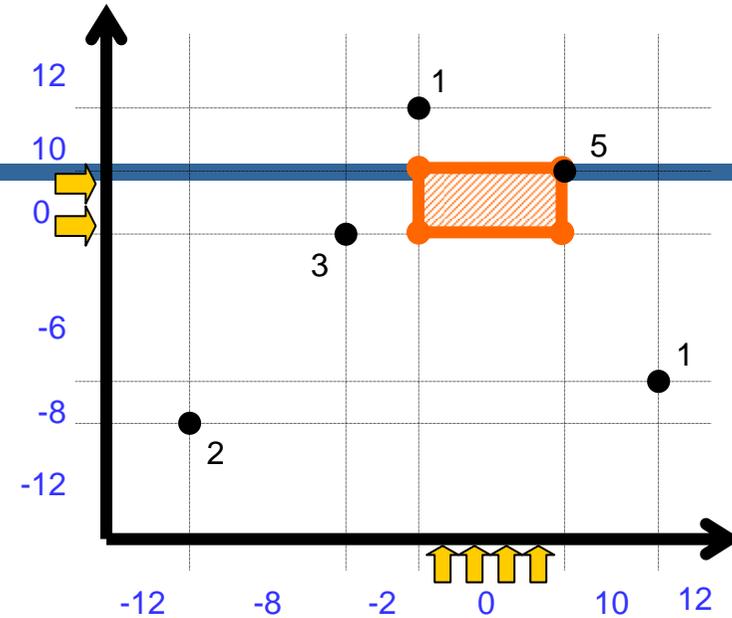
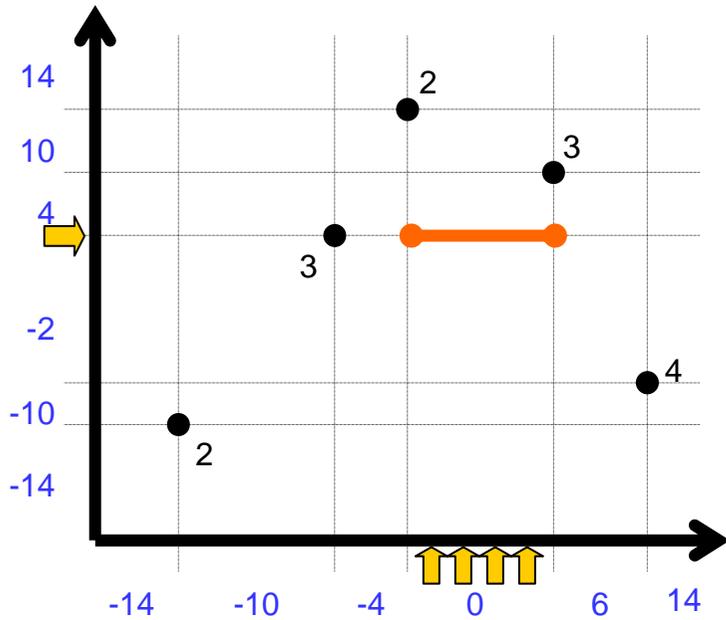
Distancia rectangular

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i (|x - a_i| + |y - b_i|)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i |x - a_i| + \sum_{i=1}^n \omega_i |y - b_i|$$



Óptimo múltiple

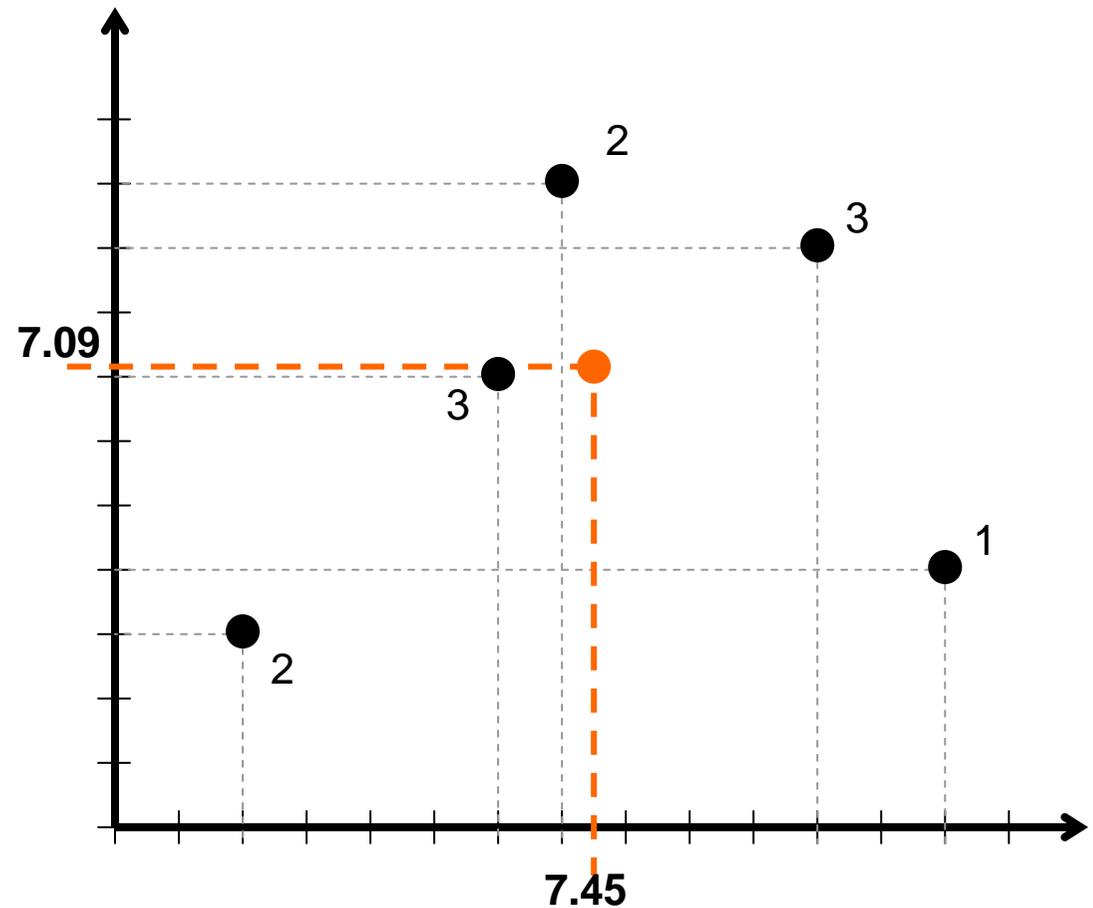


Distancia cuadrática

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i ((x - a_i)^2 + (y - b_i)^2)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i (x - a_i)^2 + \sum_{i=1}^n \omega_i (y - b_i)^2$$

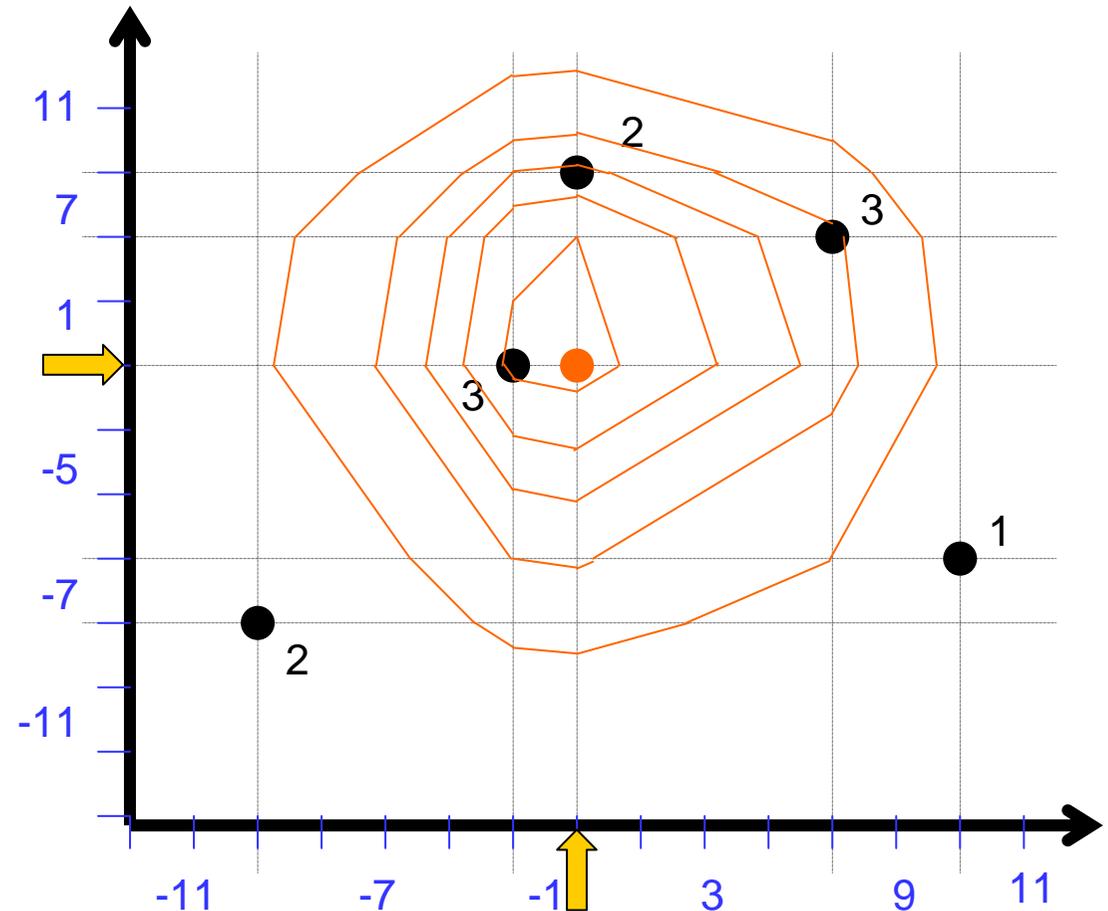
$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i a_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} ; \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i b_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$



Líneas isocoste, distancia rectangular

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i (|x - a_i| + |y - b_i|) = K$$

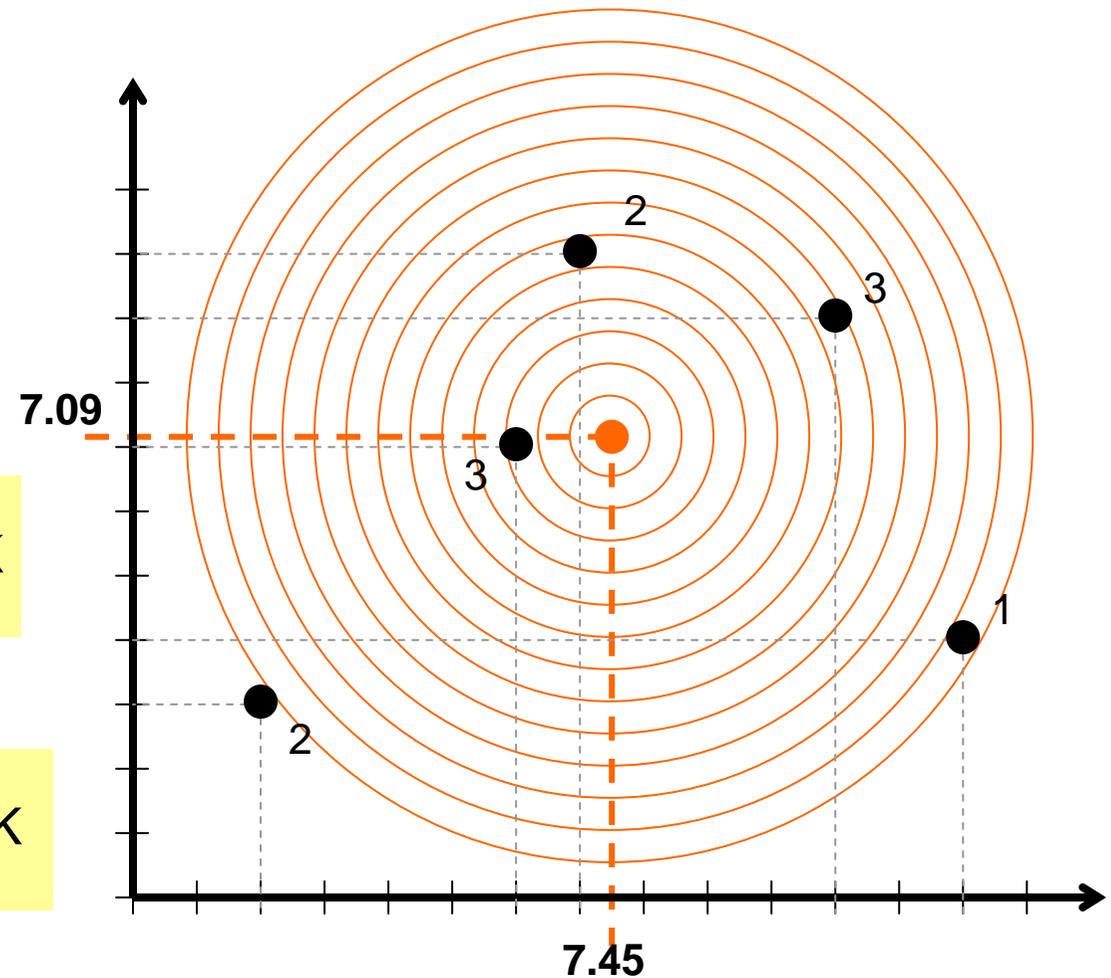
$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i |x - a_i| + \sum_{i=1}^n \omega_i |y - b_i| = K$$



Líneas isocoste, distancia cuadrática

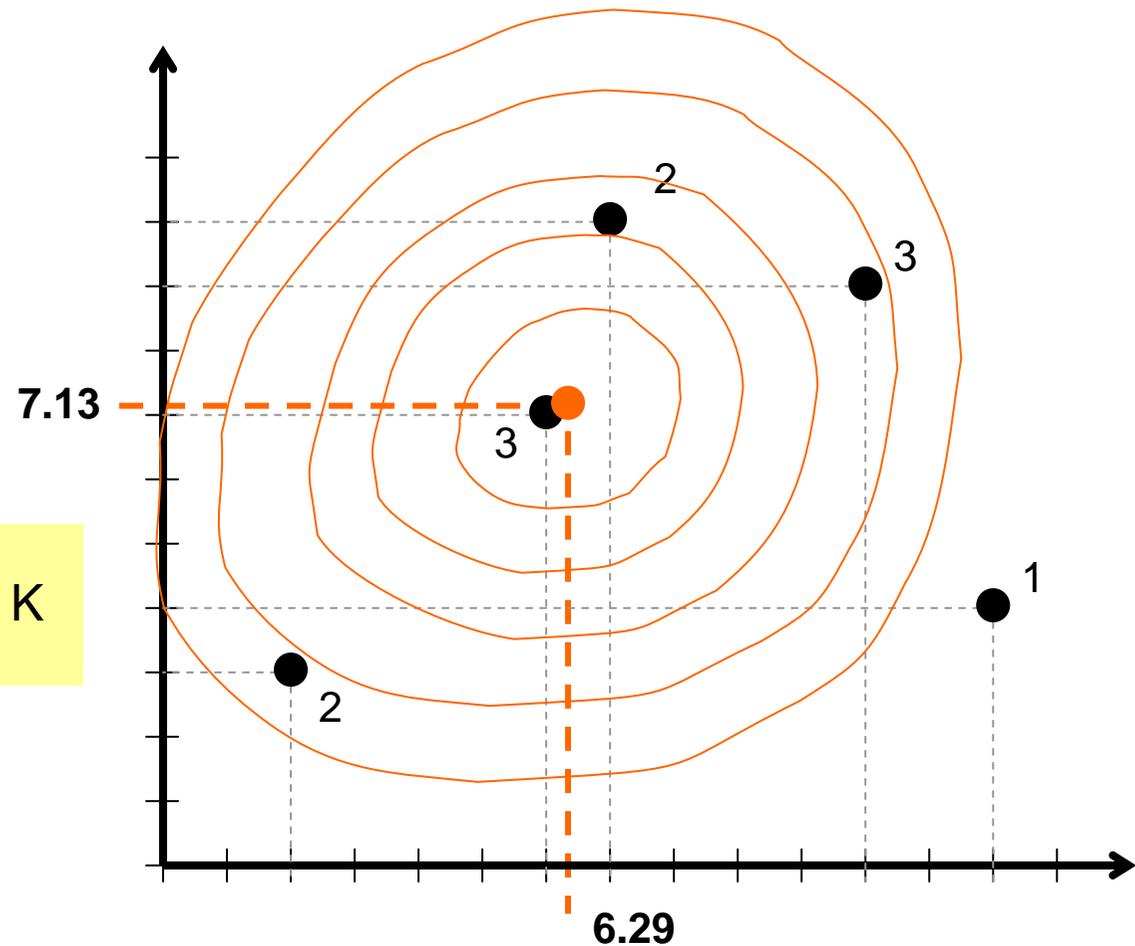
$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i \left((x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 \right) = K$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i (x - a_i)^2 + \sum_{i=1}^n \omega_i (y - b_i)^2 = K$$



Líneas isocoste, distancia euclídea

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2} = K$$



Localización de diversas instalaciones

La localización de una sola instalación es un caso particular del problema de localización, que, en general es una respuesta a un problema más amplio que incluye las preguntas:

- ◆ ¿Cuántas instalaciones?
- ◆ ¿Dónde deben localizarse?
- ◆ ¿Con qué capacidad?
- ◆ ¿Con qué instalaciones o clientes debe relacionarse cada instalación?
- ◆ ¿Qué actividades debe desarrollar cada instalación?

Asignación de productos a parcelas

Notación:

- m artículos o productos ($i=1,\dots,m$)
- n parcelas ($j=1,\dots,n$)
- p muelles de carga/descarga ($k=1,\dots,p$)

- A_i = número de parcelas necesarias para el artículo i
- c_{ij} = coste de colocar una unidad de producto i en la parcela j
- d_{kj} = distancia entre el muelle k y la parcela j

Asignación de un producto

Datos:

A = número de parcelas necesarias para el artículo

w_k = proporción de movimiento del artículo por el muelle k

$$c_j = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^p w_k * d_{kj}$$

Procedimiento:

- 1. Ordenar las parcelas en sentido no decreciente de los costes c_j**
- 2. Asignar las unidades de producto, de una en una, hasta completar A parcelas, según el orden establecido en 1.**

Asignación de un producto. Ejemplo

	(4,12) 16	(6,10) 16	(8,8) 16	(10,8) 18	(12,10) 22
S ←	(2,10) 12	(4,8) 12	(6,6) 12	(8,6) 14	(10,8) 18
	(2,8) 10	(4,6) 10	(6,4) 10	(8,4) 12	(10,6) 16
	(4,6) 10	(6,4) 10	(8,2) 10	(10,2) 12	(12,4) 16
				E ↑	

Varios tipos de producto

Planteos:

u_i : **Volumen total de artículo i.**

v_k : **Proporción del total que atraviesa el muelle k.**

u_i : **Proporción del producto i en el total de artículos.**

v_k : **Volumen total que atraviesa el muelle k.**

Volumen por celda del **artículo i** : $\frac{u_i}{A_i} = u_i'$

Distancia media a la **parcela j** : $\sum_{k=1}^p v_k * d_{kj} = f_j$

Coste de asignación del **artículo i** a la **parcela j**: $c_{ij} = u_i' * f_j$

Varios tipos de producto. Ejemplo

Prod	A_i	u_i	u_i'
M	8	64	8
N	7	49	7
P	5	25	5

u_i = número de movimientos/día.

A_i = estanterías.

		7	15	9	13	11	11	13	9	15	7		
		22	N	22	N	22	N	22	N	22	N		
		5	13	7	11	9	9	11	7	13	5		
		18	M	18	M	18	M	18	M	18	N		
		5	13	...									
		18	M	18	M	18	M	18	M	18	N		
		22	P	22	P	22	P	22	P	22	P		

Problema de Cubrimiento

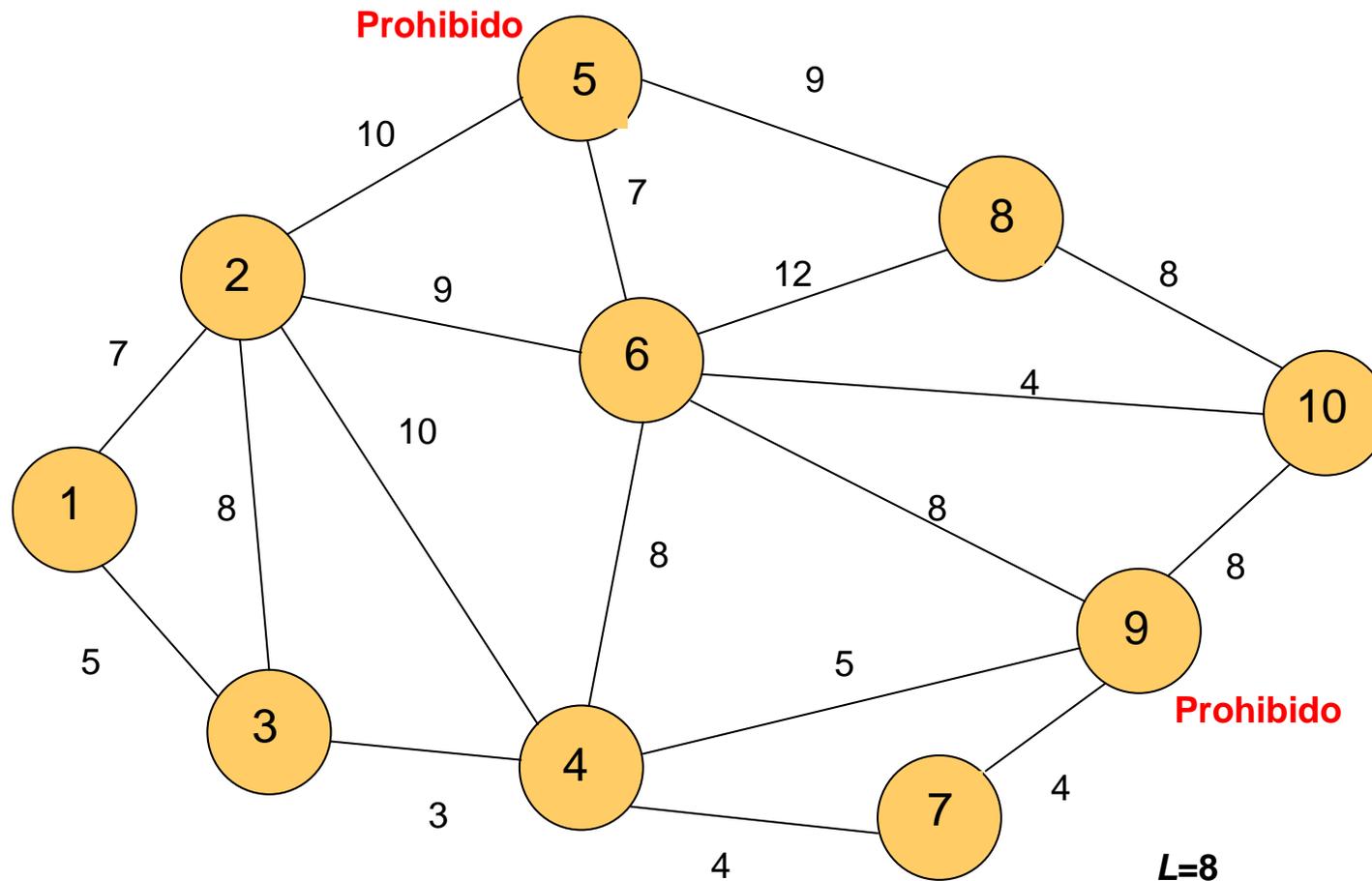
Condiciones

- Se dispone de n emplazamientos a cubrir
- Sea L la distancia máxima que cubre una instalación
- Sea d_i el peso asociado al emplazamiento i .
- Se dispone del grafo G de estructura de comunicaciones
- Se dispone del conjunto C de emplazamientos que no admiten una instalación

Objetivos

- **Minimizar el número de instalaciones** de forma que todos los emplazamientos queden cubiertos (todo emplazamiento está a una distancia menor o igual a L de la instalación más próxima)
- **Maximizar la suma de pesos** (Cobertura) de los emplazamientos cubiertos con un número de instalaciones prefijado.

Cubrimiento. Ejemplo



$d_1 =$	2
$d_2 =$	6
$d_3 =$	3
$d_4 =$	8
$d_5 =$	5
$d_6 =$	4
$d_7 =$	7
$d_8 =$	10
$d_9 =$	9
$d_{10} =$	6

Cubrimiento. Minimizar número de instalaciones

$$(\text{Min}) Z = \sum x_i$$

$$(1) x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 1$$

$$(2) x_1 + x_2 + x_3 \geq 1$$

$$(3) x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_7 \geq 1$$

$$(4) x_1 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 \geq 1$$

$$(5) x_6 \geq 1$$

$$(6) x_4 + x_6 + x_{10} \geq 1$$

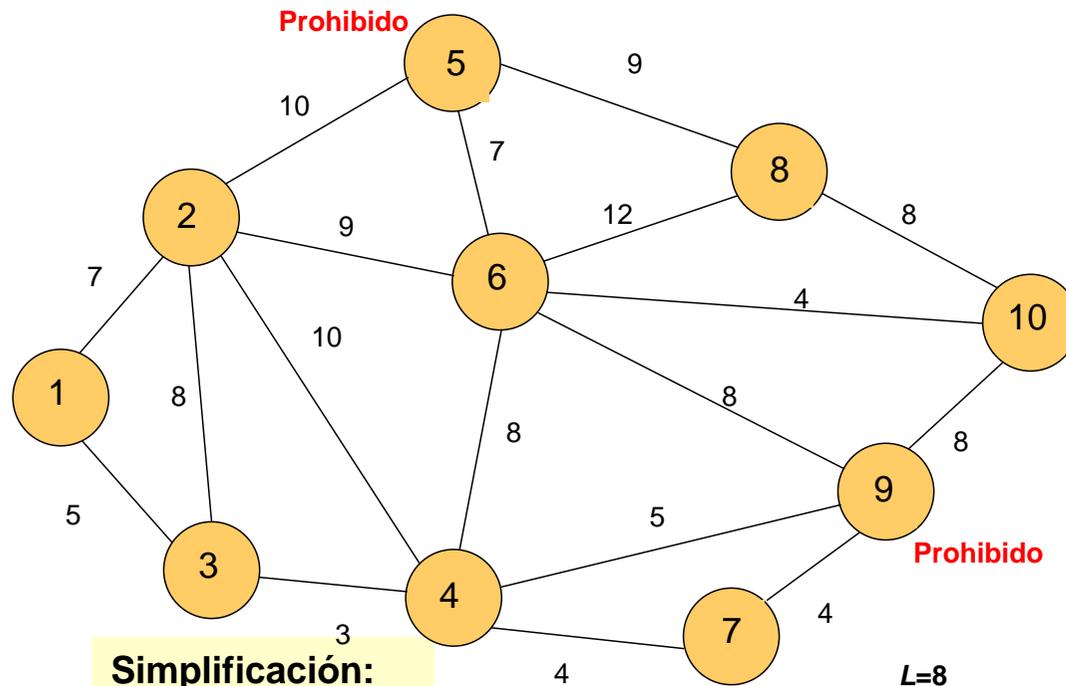
$$(7) x_3 + x_4 + x_7 \geq 1$$

$$(8) x_8 + x_{10} \geq 1$$

$$(9) x_3 + x_4 + x_6 + x_7 + x_{10} \geq 1$$

$$(10) x_6 + x_8 + x_{10} \geq 1$$

$$x_i \in \{0,1\}$$



Simplificación:

$$x_6 = 1$$

$$(2) x_1 + x_2 + x_3 \geq 1$$

$$(7) x_3 + x_4 + x_7 \geq 1$$

$$(8) x_8 + x_{10} \geq 1$$

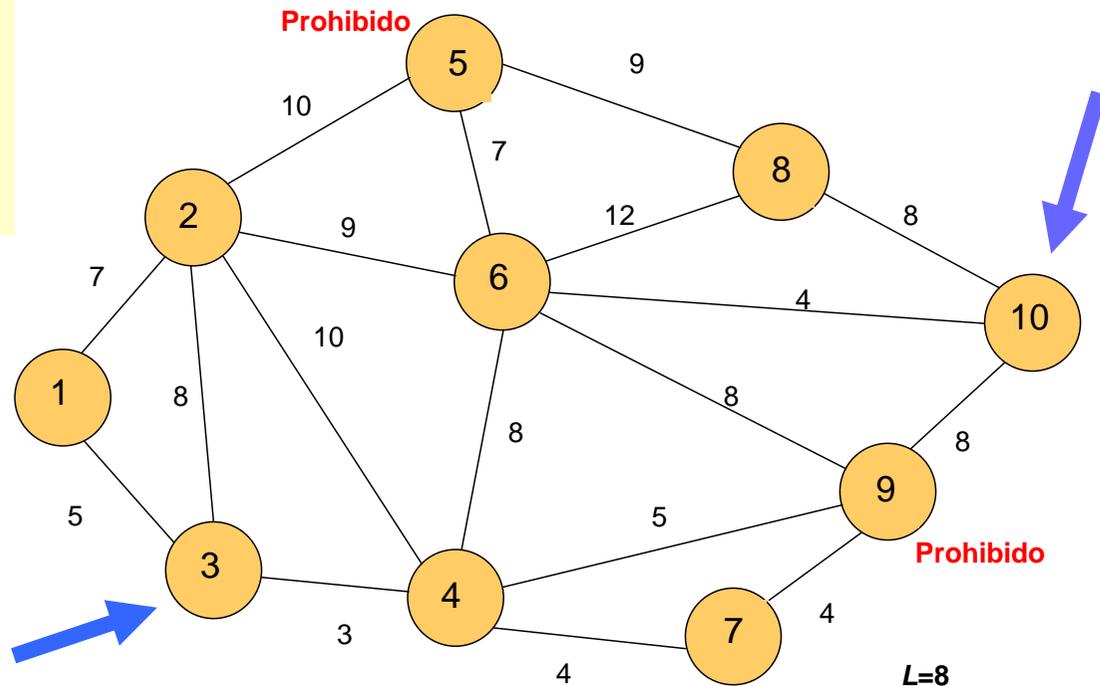
Soluciones:

3 - 6 - 8

3 - 6 - 10

Cubrimiento. Maximizar Cobertura

$d_1 = 2$	$d_2 = 6$
$d_3 = 3$	$d_4 = 8$
$d_5 = 5$	$d_6 = 4$
$d_7 = 7$	$d_8 = 10$
$d_9 = 9$	$d_{10} = 6$



Ins.	C.a.1	C.a.2
1	19	---
2	11	---
3	35	---
4	33	4
5	Prohibido	---
6	32	15
7	27	---
8	16	16
9	Prohibido	---
10	29	20

Distribución en planta

presionante y gigantesco de lo mejor muy bonito precio carísimo

4 hab., am- an comedor 29 Mill. Tel. 31213.

ge, por favor sito pelas.

¡Ganga! 2 hab., gran salón comedor, vistas. 56 Mill. Tel. 722456789

PRE

Piso señorial de 60 m2 rehabilitado. 5 hab., 2 suites, 3 baños, 1 aseo, gran salón comedor, 2 terrazas. Grandes facilidades. 36 Mill. Tel. 712908425

señ hotel

Desd mulat

Lluvi

Apartamento 17 m2 a reformar, cocina americana, 1 aseo. Ideal parejas. 38 Mill. Tel. 231654123

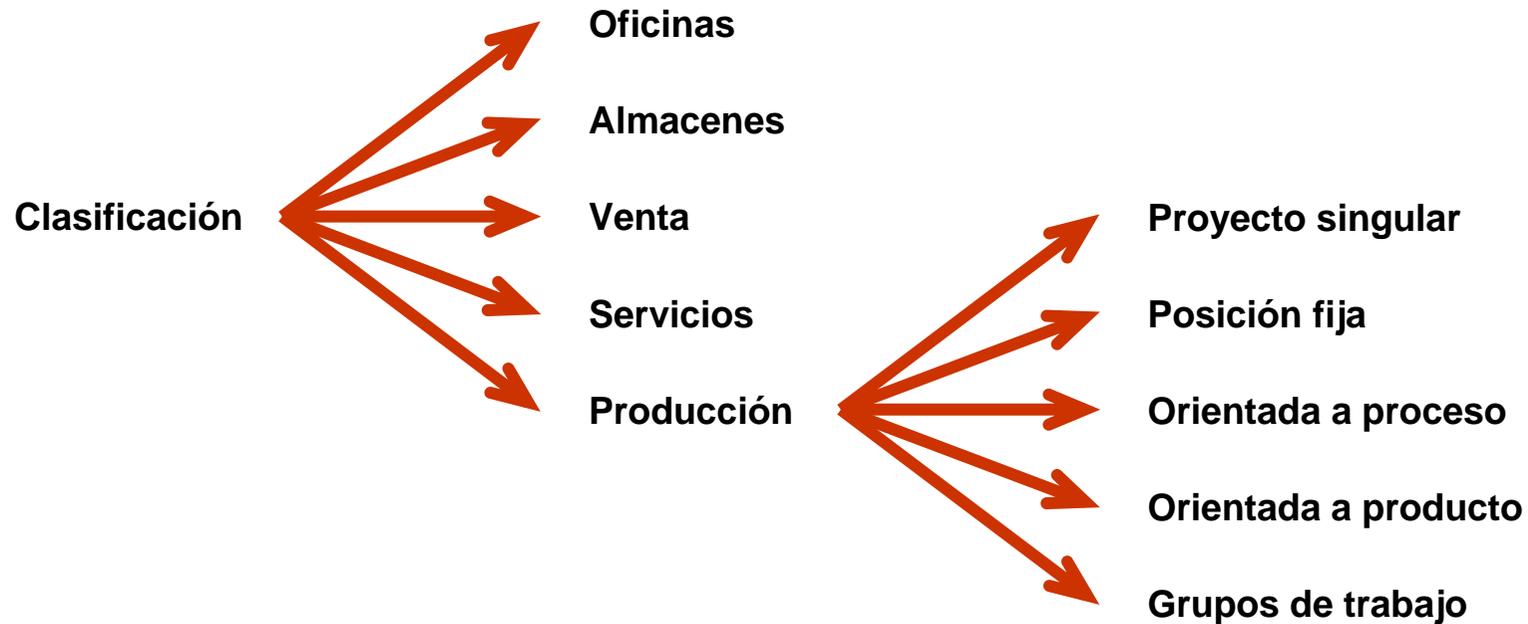
Impresionante cas



Departament
d'Organització
d'Empreses

Distribución en planta

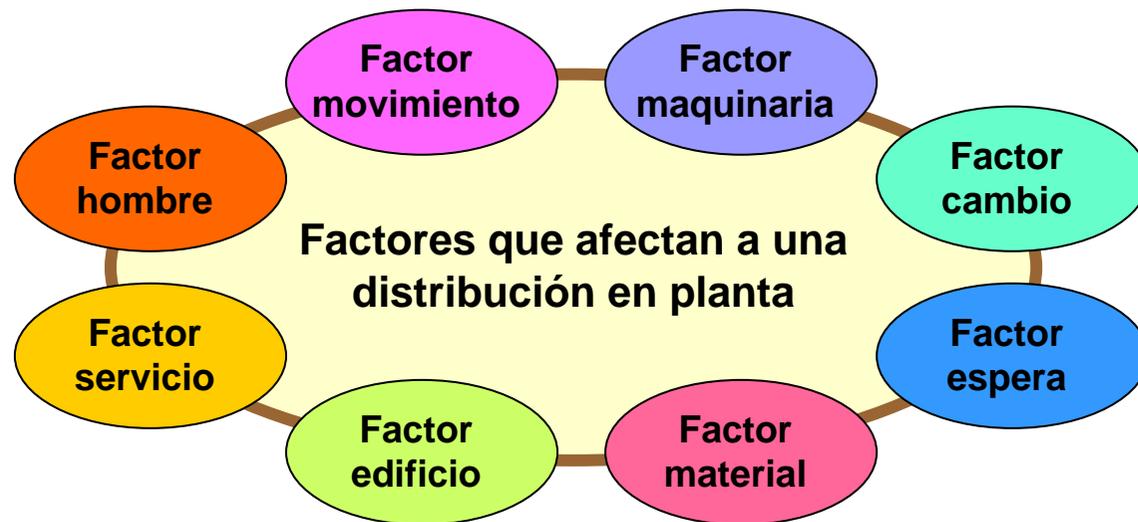
Diseñar una distribución en planta consiste en determinar la posición, en un determinado marco espacial, de los diversos elementos que integran el proceso productivo



Problemas de la distribución en planta

Tipos de problemas en la distribución en planta

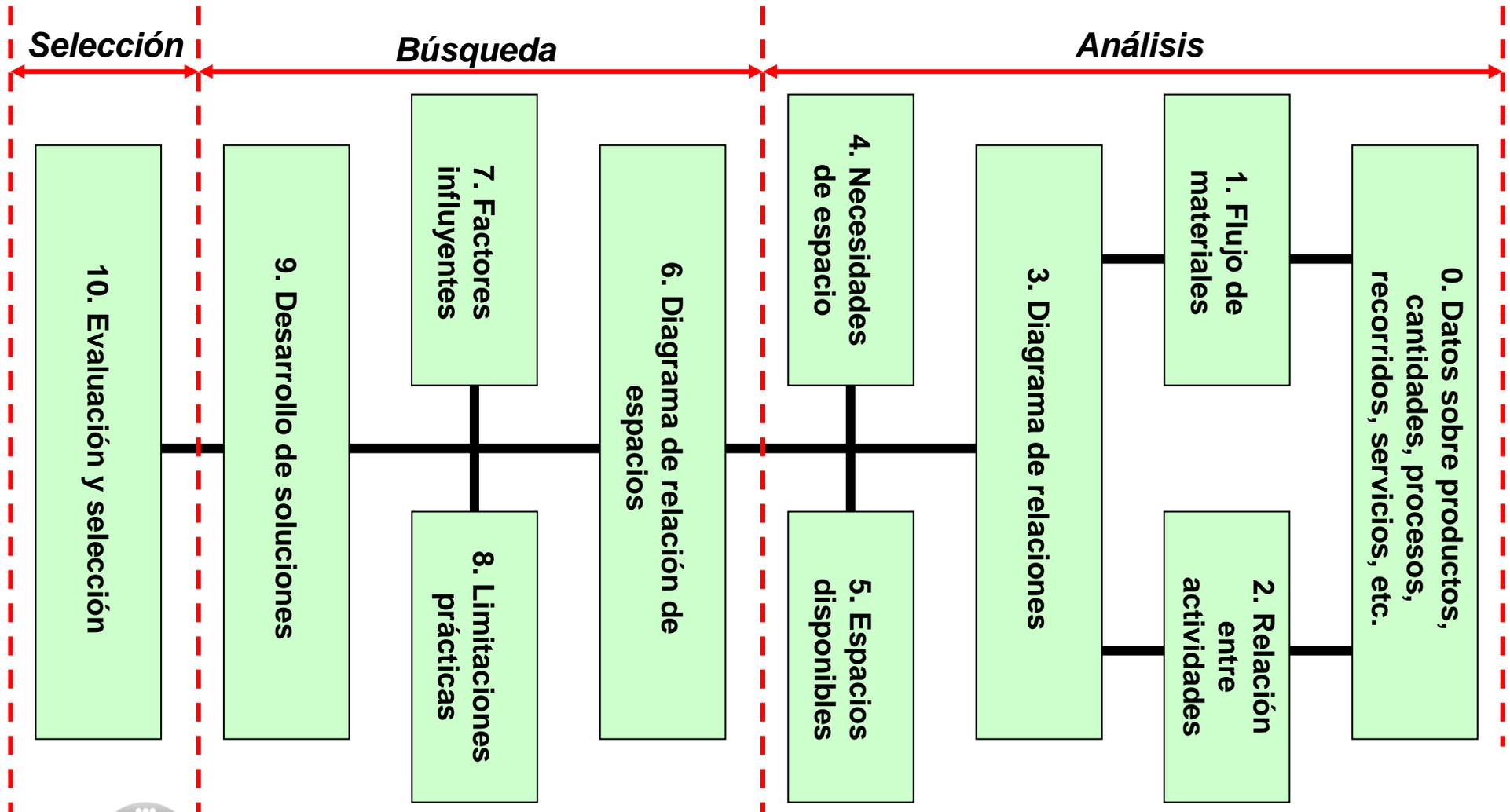
- ◆ Proyecto de una planta completamente nueva
- ◆ Extensión o traslado de una planta ya existente
- ◆ Reordenación de una distribución ya existente
- ◆ Ajustes menores en una planta



Objetivos de la distribución en planta

- Incrementar la producción
- Disminuir retrasos en la producción
- Minimizar el área ocupada
- Aumentar la seguridad de los trabajadores
- Disminuir el manejo y movimiento de los materiales
- Mejorar el uso de los factores de producción
- Reducir el material en proceso
- Acortar el tiempo de fabricación
- Reducir el trabajo administrativo e indirecto
- Mejorar la capacidad de supervisión
- Disminuir la congestión y confusión
- Elevar la moral de los trabajadores
- mejorar la flexibilidad ante cambios de condiciones
- Disminuir los riesgos para el material
- Otras (control, mantenimiento,estéticas,...)

Esquema general del método SLP



Información sobre el volumen de producción

- Se ha de disponer de previsiones para un cierto horizonte temporal, en general a largo plazo.
- Las previsiones deberán basarse en técnicas de previsión a largo plazo. Las técnicas de proyección de datos son insuficientes e incluso contraproducentes.
- Si la gama de productos es amplia habrá que proceder a la agregación de los mismos y a la ordenación según importancia.

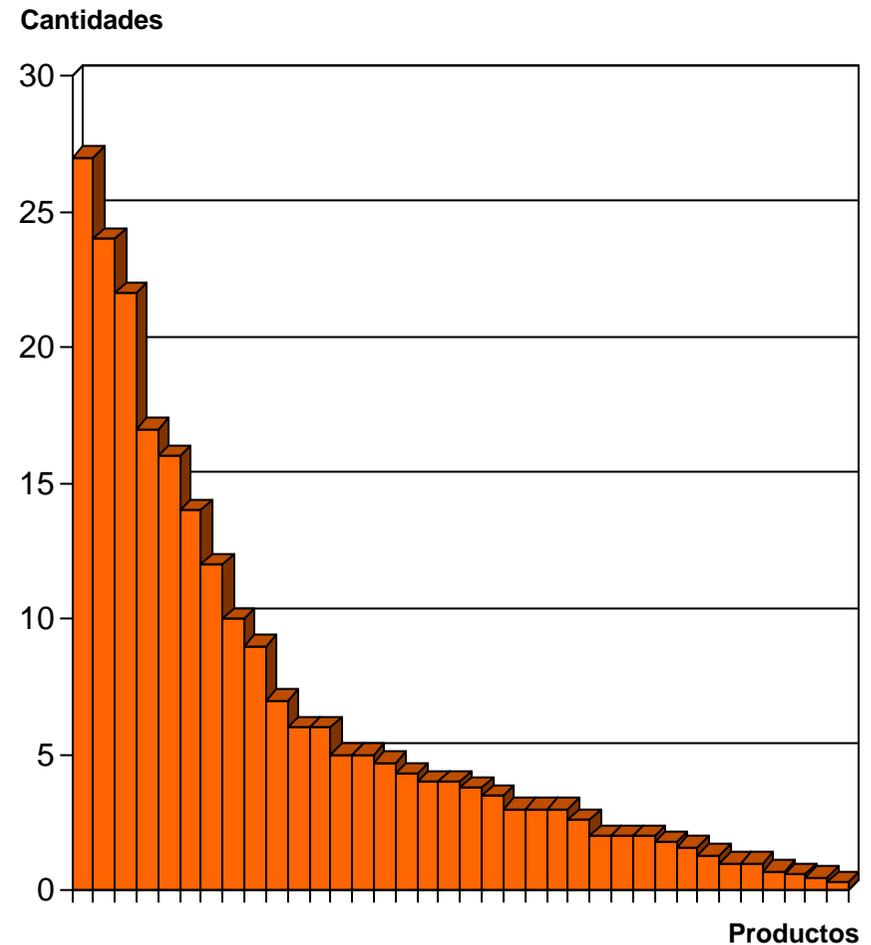
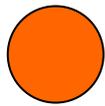


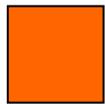
Diagrama P-Q

Símbolos de la ASME



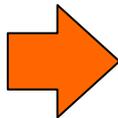
OPERACIÓN

Indica las principales fases del proceso, método o procedimiento. Por lo común, la pieza, materia o producto del caso se modifica durante la operación.



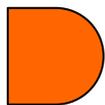
INSPECCIÓN

Indica que se verifica la calidad, la cantidad, o ambas.



TRANSPORTE

Indica el movimiento de los trabajadores, materiales y equipo de un lugar a otro.



DEPÓSITO PROVISIONAL O ESPERA

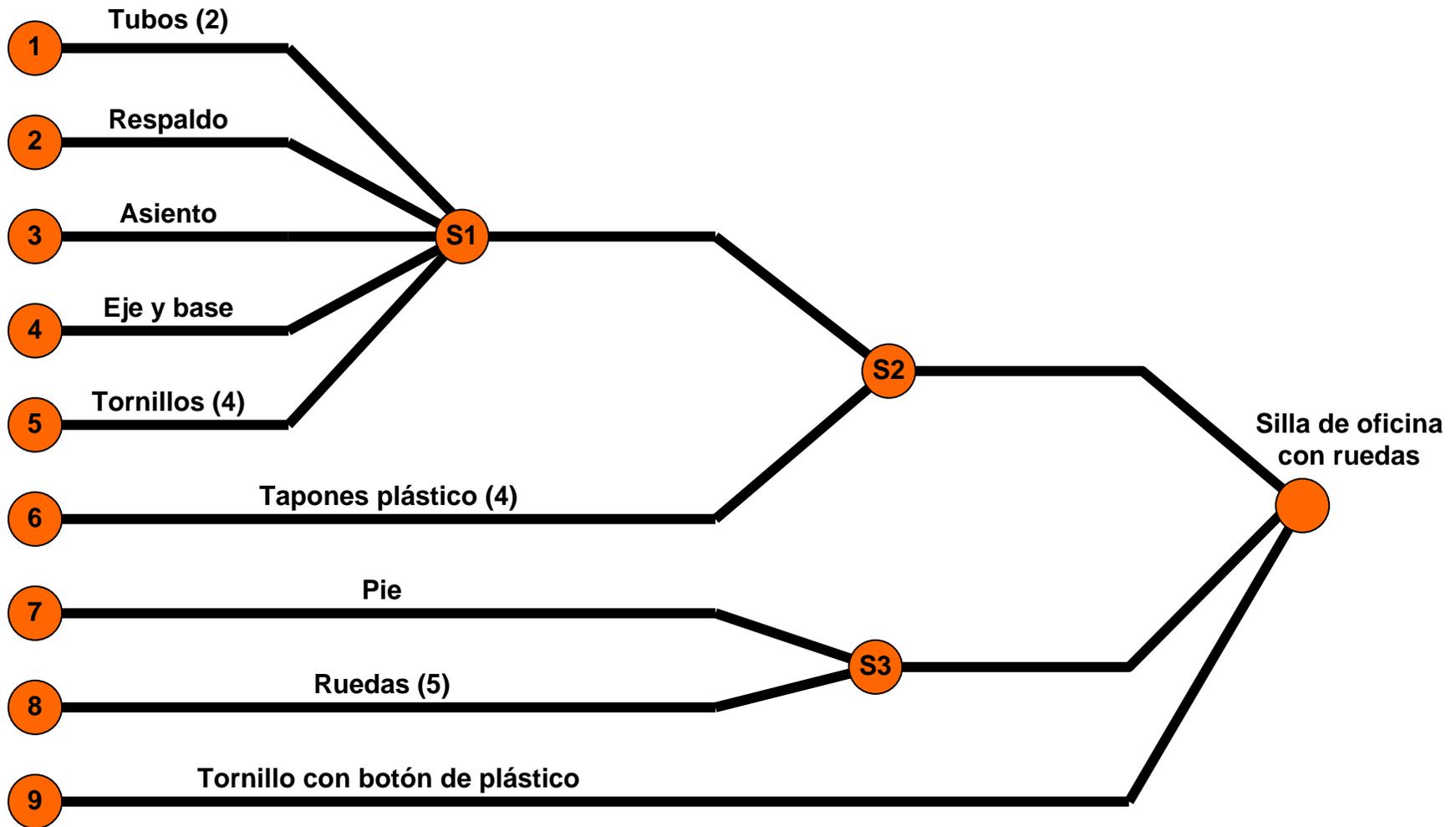
Indica demora en el desarrollo de los hechos: por ejemplo trabajo en suspenso entre dos operaciones sucesivas o abandono momentáneo, no registrado de cualquier objeto hasta que se necesite.



ALMACENAMIENTO

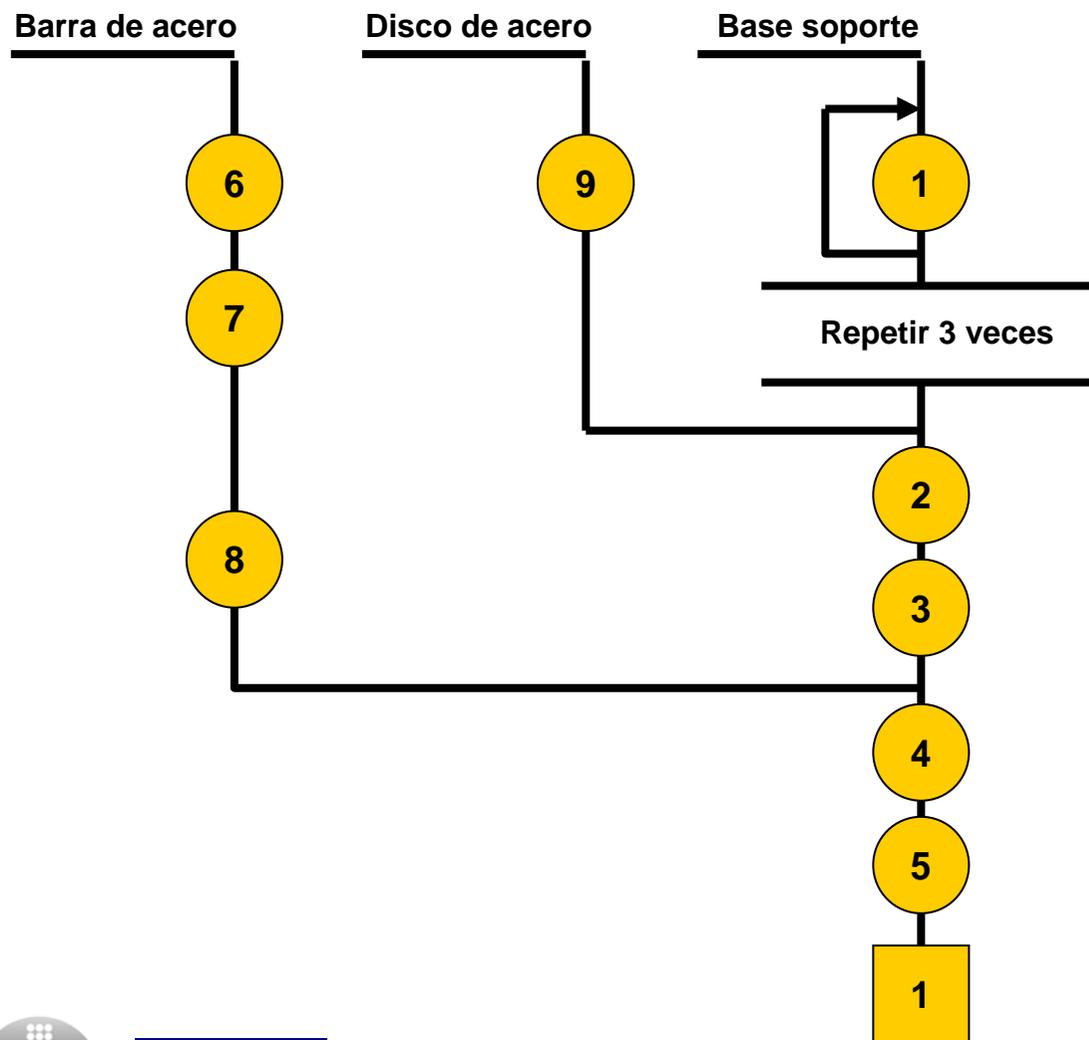
Indica depósito de un objeto bajo vigilancia en un almacén donde se lo recibe o entrega mediante alguna forma de autorización o donde se guarda con fines de referencia.

Diagrama de acoplamiento



Fuente: R. Companys, A. Corominas, **Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos 1**, Edicions UPC, Barcelona, 1993

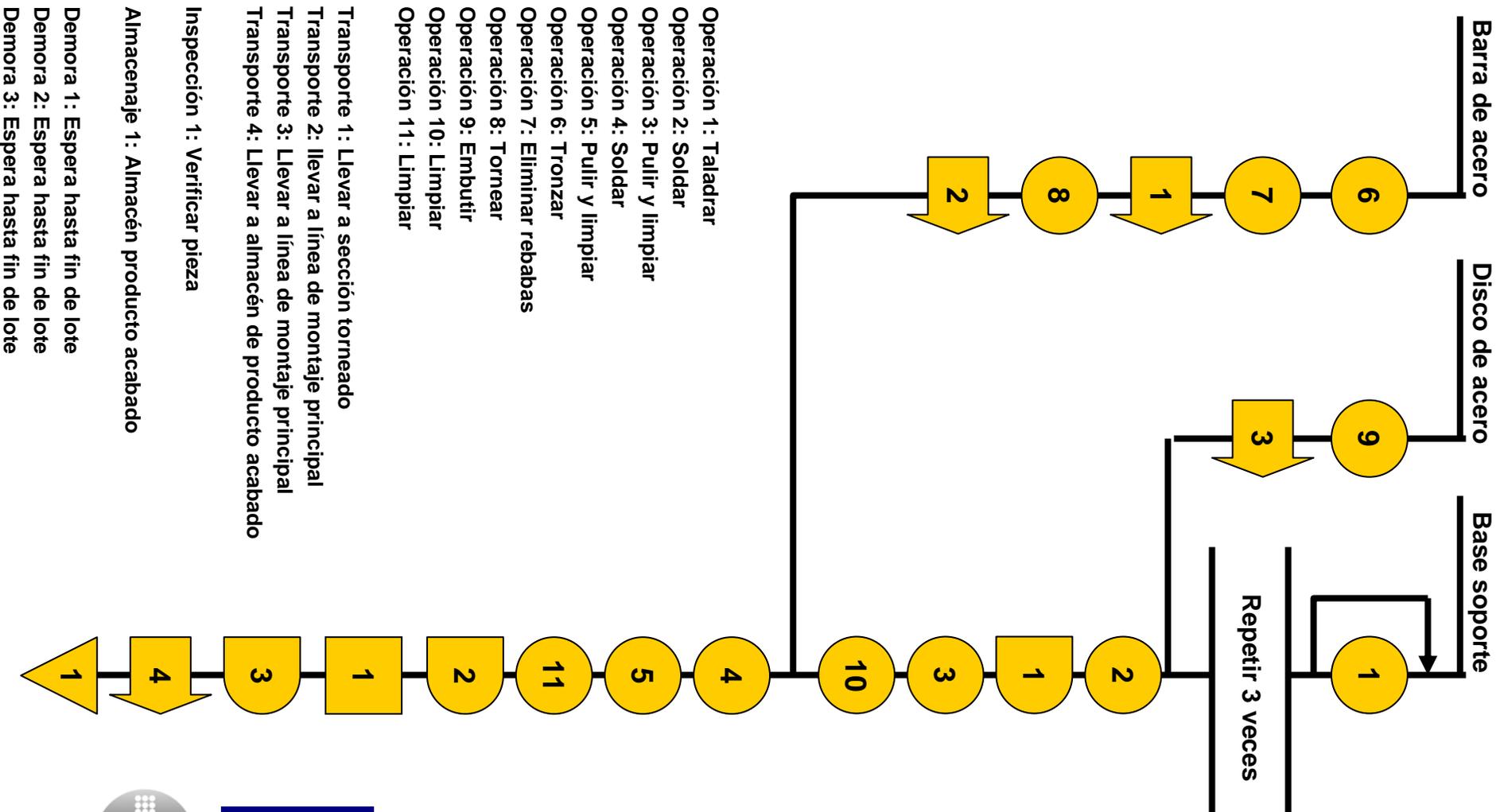
Diagrama de operaciones



- Operación 1: Taladrar
 - Operación 2: Soldar
 - Operación 3: Pulir y limpiar
 - Operación 4: Soldar
 - Operación 5: Pulir y limpiar
 - Operación 6: Tronzar
 - Operación 7: Eliminar rebabas
 - Operación 8: Tornear
 - Operación 9: Embutir
- Inspección 1: Verificar pieza

**Diagrama de
operaciones o
cursograma
sinóptico**

Diagrama analítico de operaciones



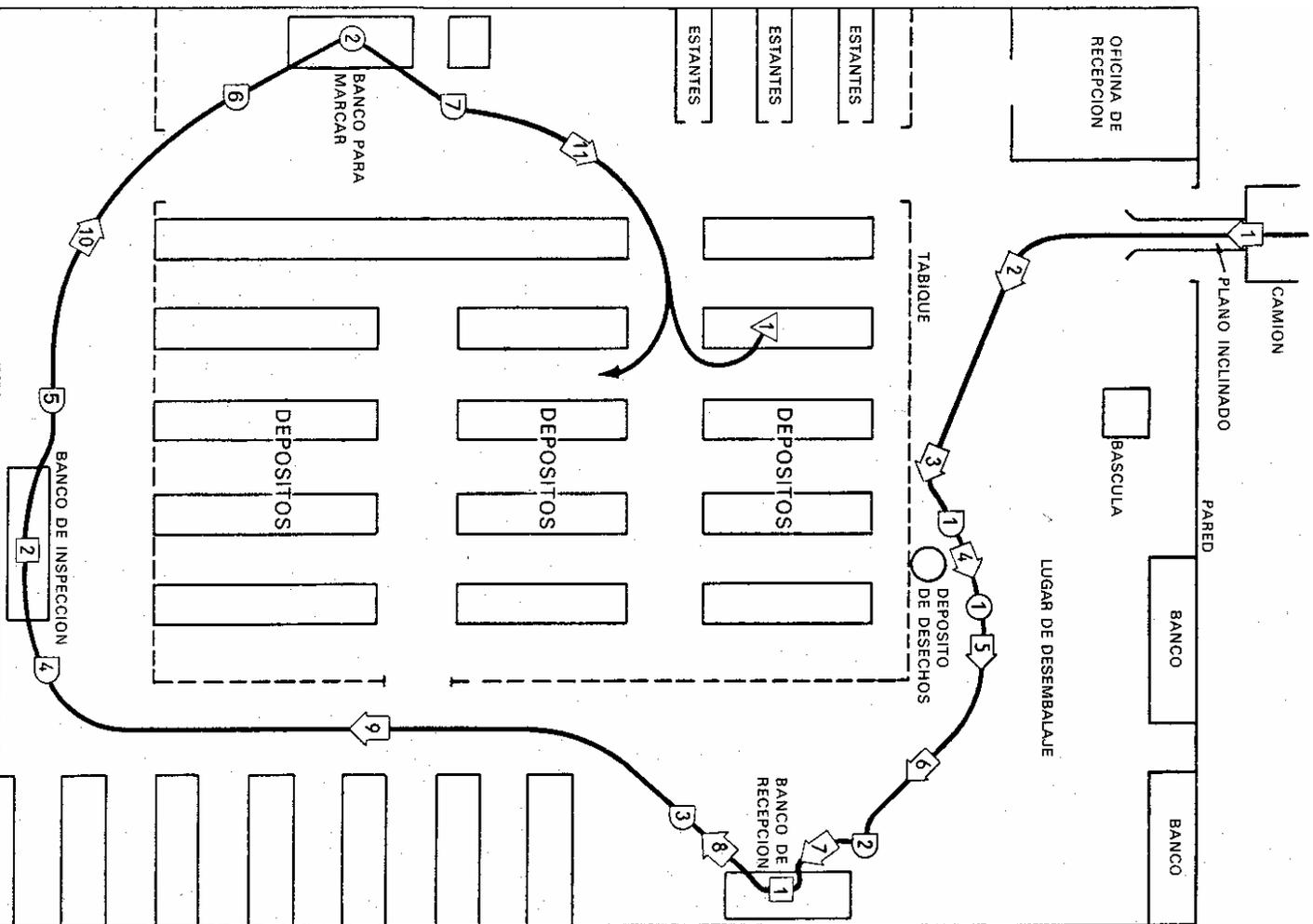
Descripción, inspección y numeración de piezas (método original)

CURSOGRAMA ANALITICO		HOJA núm. 1		OPERARIO/MATERIAL/Equipo						
DIAGRAMA núm. 3		Oleto: Cajón de piezas BX 487 (10 por cajón, en cajas de cartón)		ACTIVIDAD		R E S U M E N				
ACTIVIDAD: Recibir, comprobar, inspeccionar y numerar piezas; almacenarlas en cajones		OPERACION		ACTUAL		PROPUESTA				
MATERIAL		ESPERA		7		ECONOMIA				
MATERIAL		INSPECCION		2		ECONOMIA				
MATERIAL		ALMACENAMIENTO		1		ECONOMIA				
MATERIAL		DISTANCIA (metros)		56,2		ECONOMIA				
MATERIAL		TIEMPO (horas-hombre)		1,96		ECONOMIA				
MATERIAL		COSTO por cajón		\$ 10,19		ECONOMIA				
MATERIAL		MANO DE OBRA		1		ECONOMIA				
MATERIAL		TOTAL		\$ 10,19		ECONOMIA				
MATERIAL		DESCRIPCION		SIMBOLO		OBSERVACIONES				
MATERIAL		CAN-TI-DAD		D/S-TAN-CIA		TIEM-PO				
MATERIAL		1 caja		(m)		(min.)				
Sacado de camión: colocado en plano inclinado		12						2 peones		
Deslizado por plano inclinado		6						2 »		
Deslizado hasta almacén y apilado		6						2 »		
Espera hasta apertura				30						
Cajón bajado										
Destapado: nota de entrega sacada				5				2 »		
Cajón colocado en carretilla		1								
Acarreado hasta banco de recepción		9						2 »		
Espera hasta descarga de carretilla				10				2 »		
Cajón colocado en banco		1								
Cajas cartón extraídas, abiertas; contenido verificado, colocado de nuevo				15				Enargado almacén		
Cajón cargado en carretilla		1						2 peones		
Demora en espera de traslado				5						
Cajón acarreado a banco de inspección		16,5						1 peón		
Espera hasta inspección				10				Cajón en carretilla		
Piezas extraídas de cajón y cajas colgadas con diseño, embaladas de nuevo		1						Inspector		
Espera del carretillero				5				Cajón en carretilla		
Cajón acarreado a banco de numeración		9						1 operario		
Espera para ser numerado				15				Cajón en carretilla		
Piezas extraídas de cajón y cajas numeradas y embaladas de nuevo				4,5				Peón de almacén		
Espera del carretillero				5				Cajón en carretilla		
Cajón llevado al lugar de distribución				5				1 peón		
Puesto en depósito										
TOTAL ...		56,2		174		2	11	7	2	1

Fuente: OIT, Introducción al estudio del trabajo, 3a edición, Ginebra 1980

Diagrama de recorrido

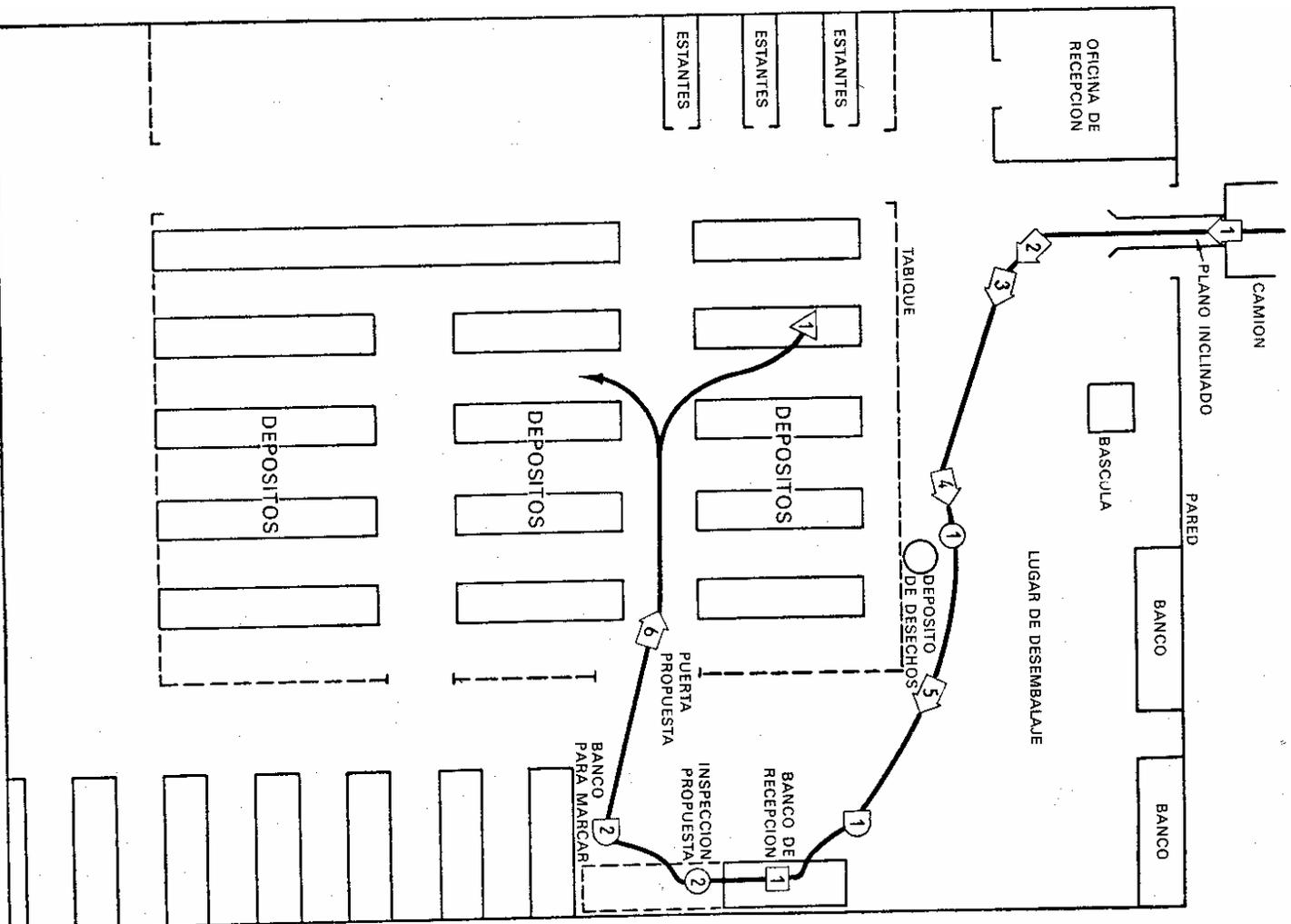
Descripción, inspección y numeración de piezas (método original)



Fuente: OIT, Introducción al estudio del trabajo, 3a edición, Ginebra 1980

Diagrama de recorrido

Descripción, inspección y numeración de piezas (método perfeccionado)



Fuente: OIT, Introducción al estudio del trabajo, 3a edición, Ginebra 1980

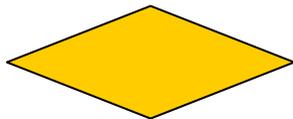
Símbolos para los diagramas de procesos



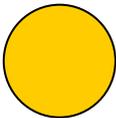
Puntos de inicio y final del proceso



Tarea en el diagrama. Cualquier actividad que no pueda indicarse mediante el resto de símbolos



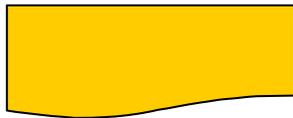
Punto de decisión. Cada rombo ha de contener una pregunta que pueda responderse con *si* o *no* (o un muy reducido número de alternativas)



Conector de tareas entre diferentes partes del diagrama dentro de la misma página. Lleva un código dentro del círculo.



Conector de tareas entre diferentes páginas de un diagrama. Lleva un código dentro del círculo para indicar la página y tarea de origen o destino.



Documento

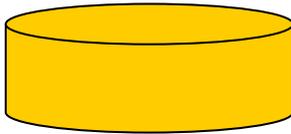


Indica la dirección del flujo del proceso



Indica una transferencia electrónica de datos

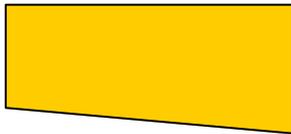
Símbolos auxiliares



Proceso de datos



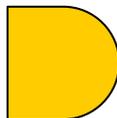
Preparación, confección o cumplimiento de un documento.



Comprobación, verificación o autorización.

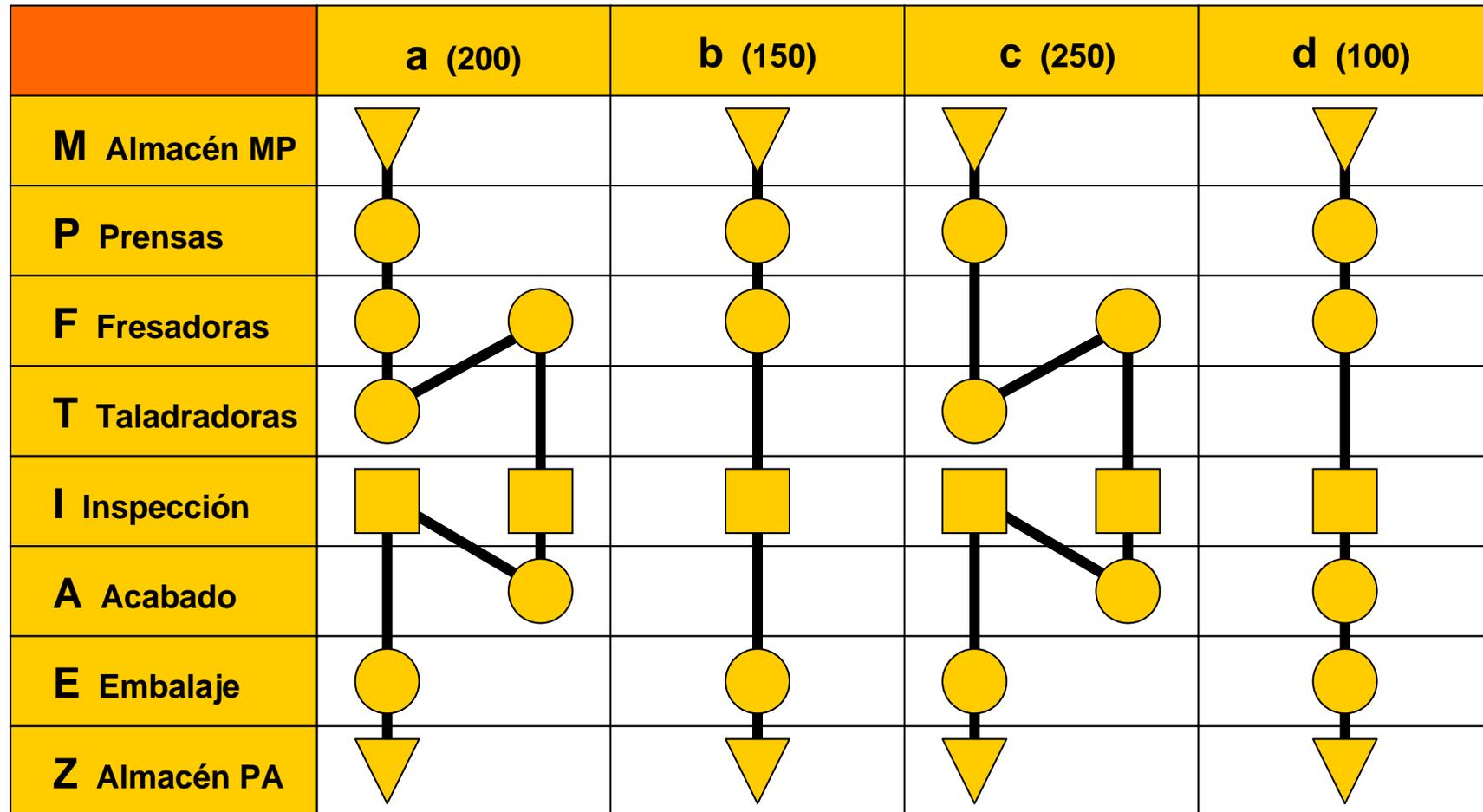


Almacenamiento o archivo.



Demora.

Diagrama multiproducto



Matriz origen-destino

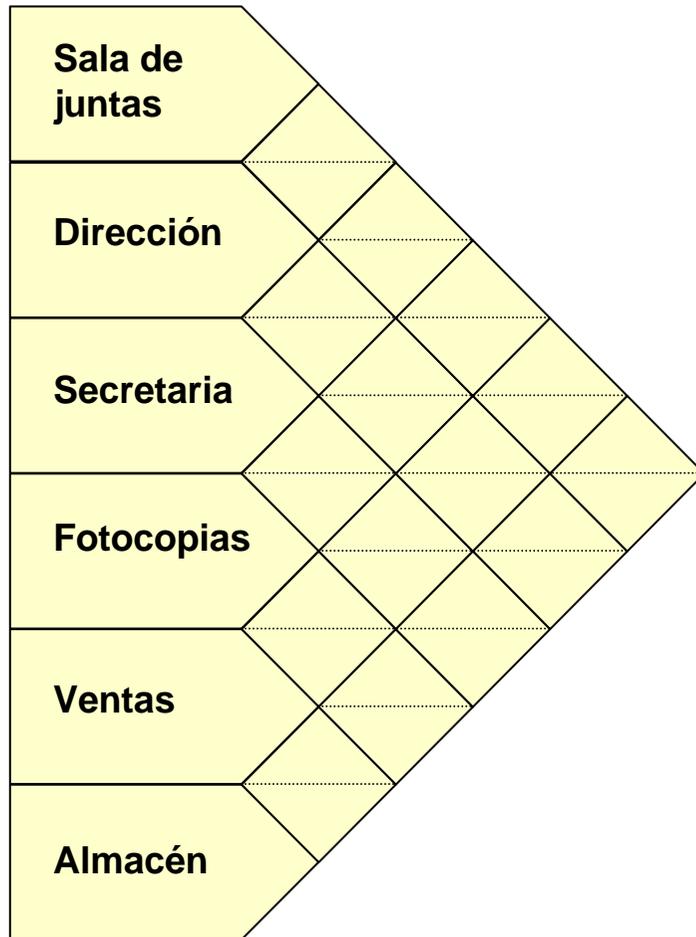
	M	P	F	T	I	A	E	Z
M		a,b, c,d						
P			a,b, d	c				
F				a	a,b, c,d			
T			a,c					
I						a,b, d	a,b, c	
A					a,c		d	
E								a,b, c,d
Z								

Cualitativa

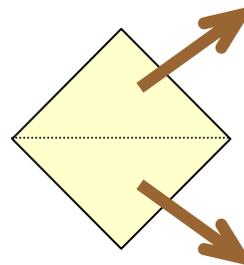
	M	P	F	T	I	A	E	Z
M		700						
P			450	250				
F				200	700			
T			450					
I						550	600	
A					450		100	
E								700
Z								

Cuantitativa

Tabla de relaciones de Muther

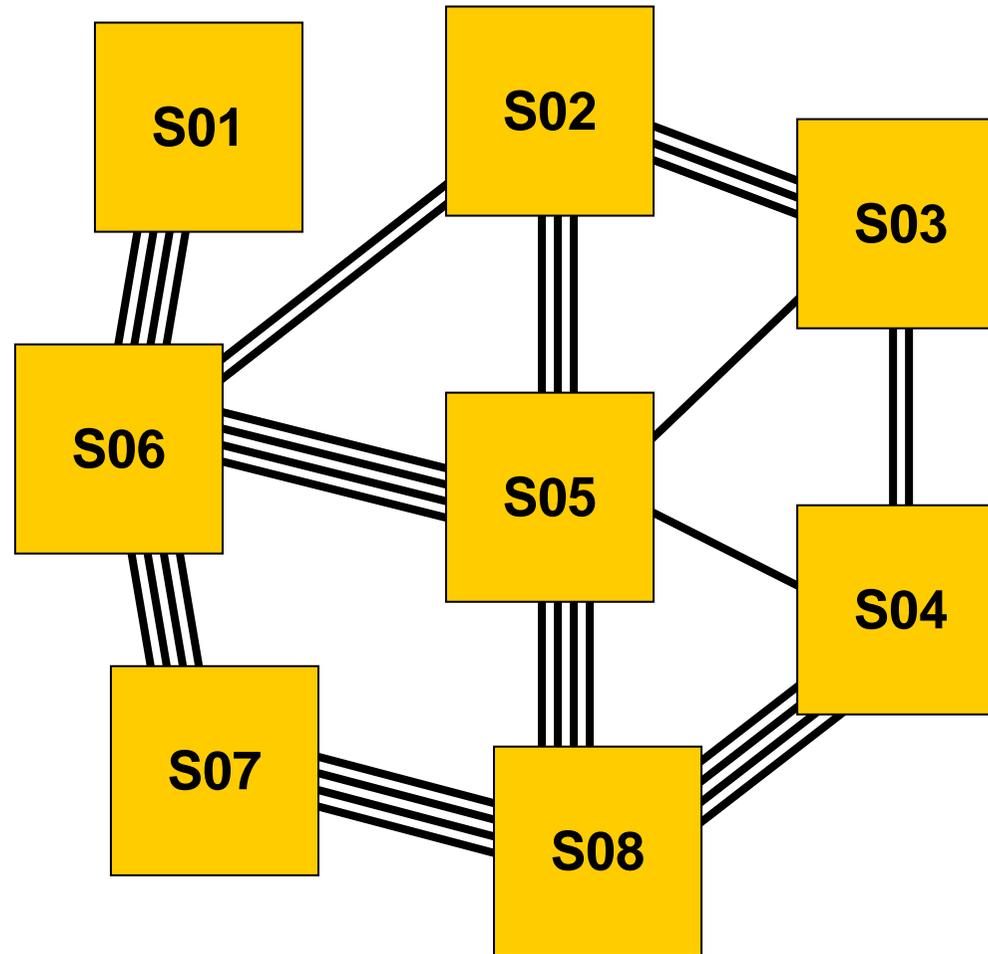


Código	Definición
A	Absolutamente necesario
E	Especialmente importante
I	Importante
O	No importante
U	Indiferente
X	indeseable



Código	Motivos
A	Supervisión
E	Contacto frecuente
I	Comunicación esporádica
...	...

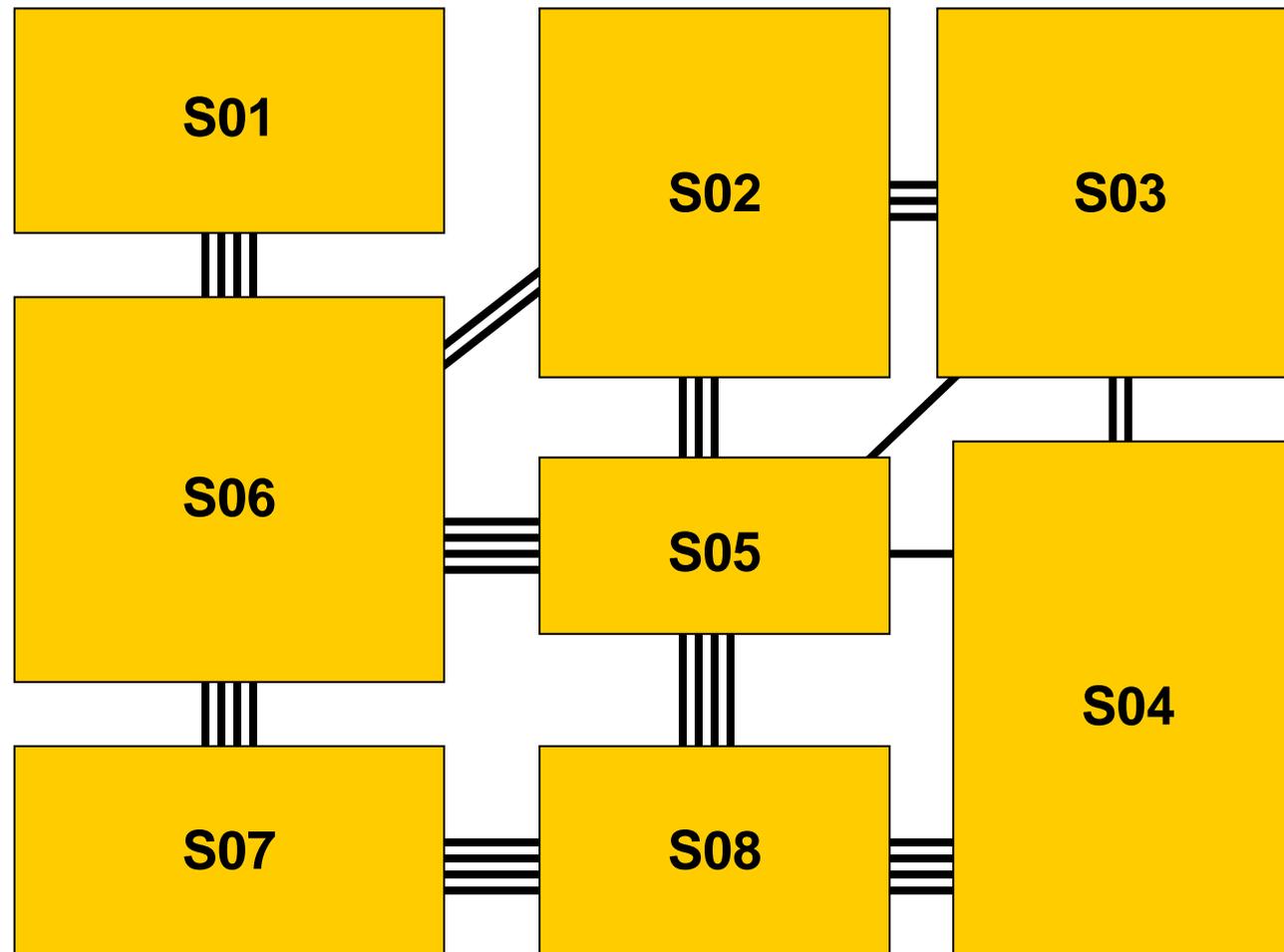
Diagrama de relación de actividades



Actividades o elementos que precisan espacio

- **Materias primeras**
- **Obra en curso**
- **Productos terminados**
- **Pasillos**
- **Zonas de recepción y expedición**
- **Muelles de carga y descarga**
- **Aparcamiento de los vehículos de transporte**
- **Zonas de embalaje y *picking***
- **Embalaje**
- **Equipos móviles de manutención**
- **Mandos**
- **Elementos de seguridad (escaleras de incendios, salidas de emergencia, extintores,...)**
- **Herramientas**
- **repuestos**
- **Instalaciones médicas y botiquín**
- **Lavabos, duchas, vestidores**
- **oficinas**
- **Inspección y control de calidad**
- **Almacén de fungibles y varios**
- **Aparcamiento de empleados y visitas**
- **Bar, cantina o servicio de comedor**

Diagrama de relación de espacios



Restricciones a la distribución en planta

- **Columnas y paredes maestras**
- **Monumentos (líneas de pintura, líneas tr nsfer, máquinas con cimentación,...)**
- **Altura del techo**
- **Obstáculos al acceso desde el exterior**
- **Edificios de varios pisos**
- **Situación de los servicios públicos**
- **Cambios en el nivel del suelo**
- **Posición de los puentes grúa**
- **Dimensiones de las secciones del edificio**
- **Límites de resistencia del suelo**

Criterios de selección de distribuciones

- **Inversión**
- **Coste de explotación o funcionamiento**
- **Flexibilidad**
- **Facilidad de expansión**
- **Seguridad**
- **Eficacia en la manipulación de materiales**
- **Factores estéticos, aspecto**
- **Adaptación a la estructura orgánica**
- **Condiciones de trabajo**
- **Uso de los equipos**
- **Facilidad de supervisión control**

Distribución por posición fija

■ Ventajas:

- ◆ Poca manipulación de la unidad principal de montaje.
- ◆ Alta flexibilidad para adaptarse a variantes de un producto e incluso a una diversidad de productos.

■ Inconvenientes:

- ◆ Ocupación de espacio.
- ◆ Manutención de las piezas hasta el emplazamiento principal de montaje.
- ◆ Dificultad para utilizar equipos difíciles de mover.

■ Recomendable si:

- ◆ El coste de mover la pieza principal es elevado.
- ◆ El número de unidades a producir es bajo.
- ◆ Las operaciones requieren principalmente trabajo manual o herramientas o maquinarias ligeras.

Fuente: R. Company, A. Corominas, **Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos 1**, Edicions UPC, Barcelona, 1993

Distribución orientada a proceso

■ **Ventajas:**

- ◆ **Mayor utilización de los equipos y, por tanto, menor inversión.**
- ◆ **Flexibilidad para cambios en los productos y en el volumen de la demanda.**
- ◆ **Mayor fiabilidad.**
- ◆ **Posibilidad de individualizar rendimientos.**

■ **Inconvenientes:**

- ◆ **Manutención cara.**
- ◆ **Alto estoc de materiales en curso de elaboración.**
- ◆ **Programación compleja.**

■ **Recomendable si:**

- ◆ **Variedad de productos y demanda baja o intermitente de cada uno de ellos.**
- ◆ **Maquinaria cara y difícil de trasladar.**

Fuente: R. Companys, A. Corominas, **Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos 1**, Edicions UPC, Barcelona, 1993

Distribución orientada a producto

■ **Ventajas:**

- ◆ **Mínima manipulación de los materiales.**
- ◆ **Reducción del tiempo entre el inicio del proceso y la obtención del producto.**
- ◆ **Menos material en curso.**
- ◆ **Mano de obra más fácil de entrenar y substituir.**
- ◆ **Programación y control sencillos**

■ **Inconvenientes:**

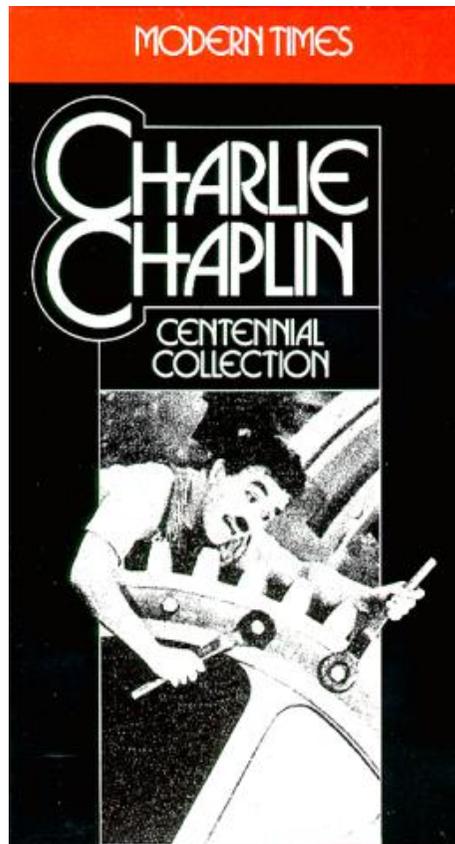
- ◆ **mayor inversión.**
- ◆ **Rigidez.**
- ◆ **Diseño y puesta a punto más complejos.**
- ◆ **El ritmo de producción lo marca la máquina más lenta.**
- ◆ **Una avería puede interrumpir todo el proceso.**
- ◆ **Tiempos muertos en algunos puestos de trabajo.**
- ◆ **El aumento del rendimiento individual no repercute en el rendimiento global.**

■ **Recomendable si:**

- ◆ **Alto volumen de producción de unidades idénticas o bastante parecidas.**
- ◆ **Demanda estable.**

Fuente: R. Companys, A. Corominas, **Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos 1**, Edicions UPC, Barcelona, 1993

Métodos y tiempos



DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

Definición del estudio de métodos

El estudio de métodos es el registro y examen crítico sistemático de los métodos existentes y proyectados de llevar a cabo un trabajo, como medio de idear y aplicar métodos más sencillos y eficaces y de reducir los costes

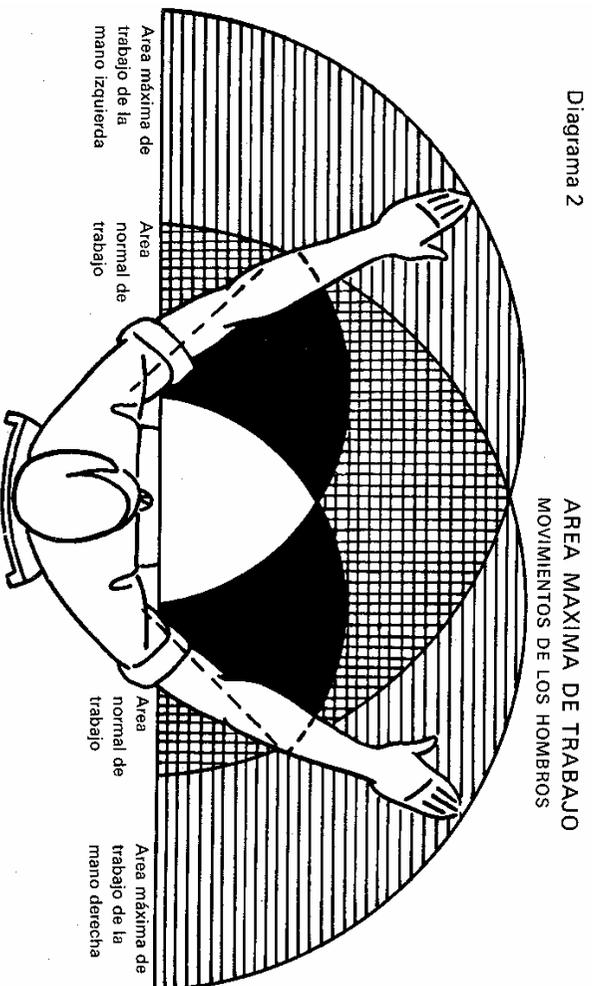
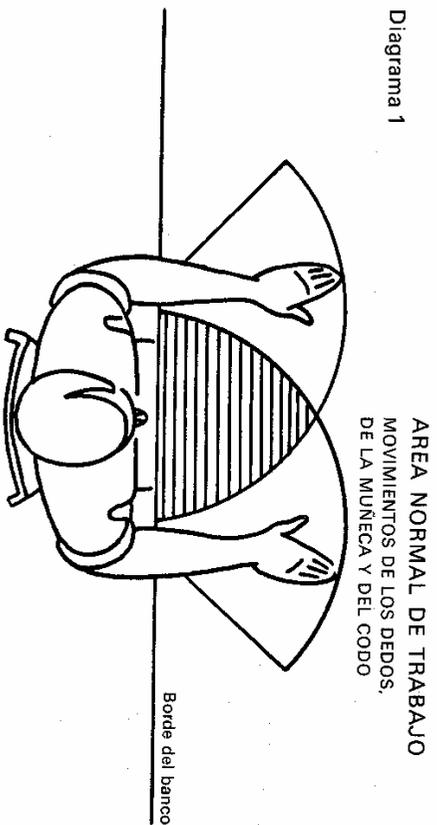
Finalidad:

- ◆ **Mejorar los procesos y los procedimientos.**
- ◆ **Mejorar la disposición de la fábrica, taller y lugar de trabajo, así como de los modelos de máquinas e instalaciones.**
- ◆ **Economizar el esfuerzo humano y reducir la fatiga innecesaria.**
- ◆ **Mejorar la utilización de materiales, máquinas y mano de obra.**
- ◆ **Crear mejores condiciones materiales de trabajo.**

Reglas en el diseño de métodos

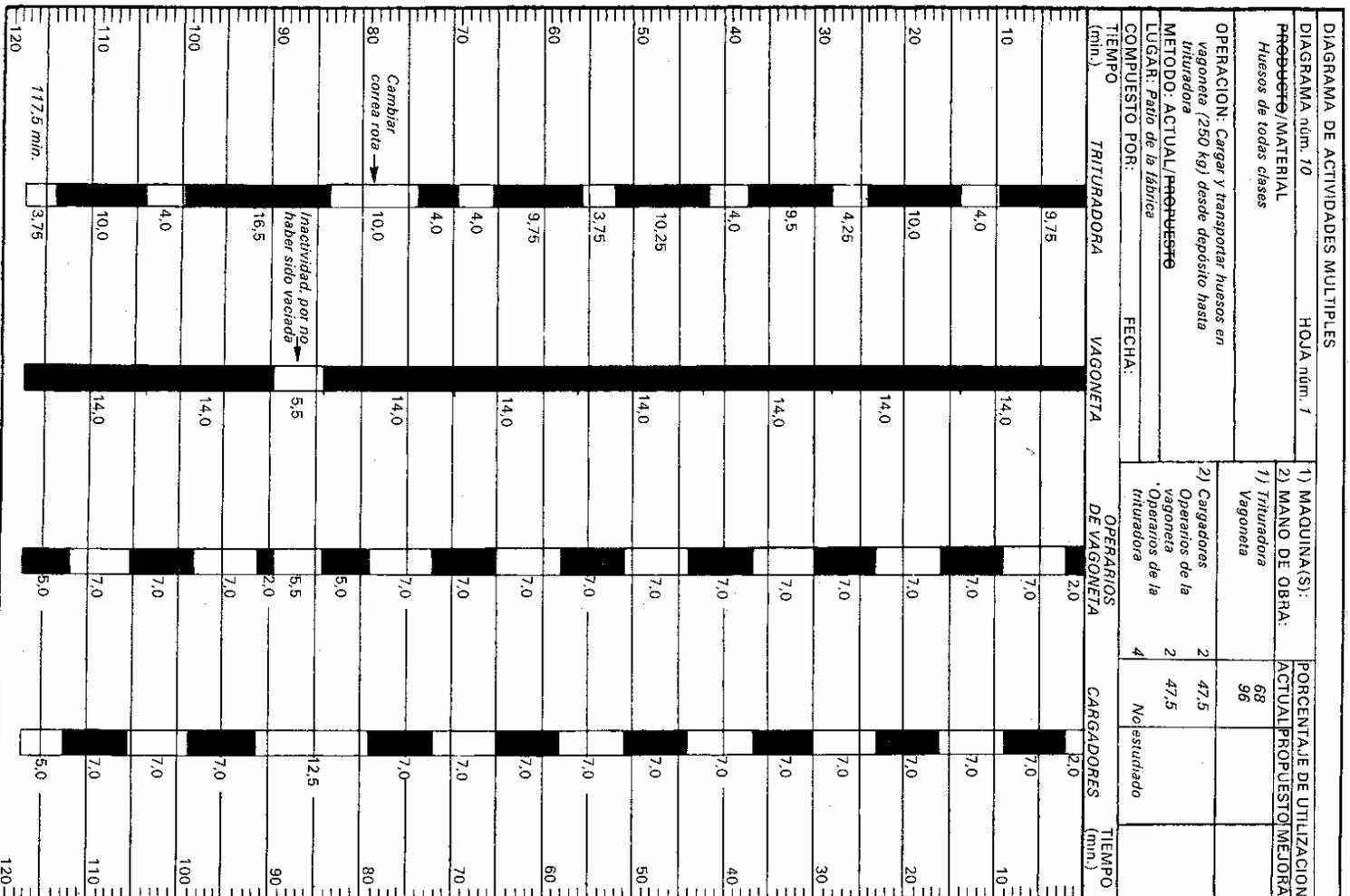
- **Simplificar los movimientos todo lo que sea posible, de forma que tengan lugar siempre dentro de las esferas de trabajo y que intervenga en ellos el menor número de músculos.**
- **Evitar cambios bruscos de dirección y las paradas.**
- **Conviene que ambas manos se muevan simultánea y simétricamente.**
- **Las alturas de las superficies de trabajo y de los asientos han de permitir que el operario trabaje, indistintamente, sentado o de pie.**
- **Los materiales y las herramientas han de estar en posiciones fijas, dentro de las esferas de trabajo.**
- **Aprovechar la gravedad para el aprovisionamiento de componentes y para la evacuación de subconjuntos o de productos.**
- **Utilizar soportes y dispositivos de sujeción y no confiar estas funciones a las manos ni a otra parte del cuerpo humano.**

Esferas de trabajo



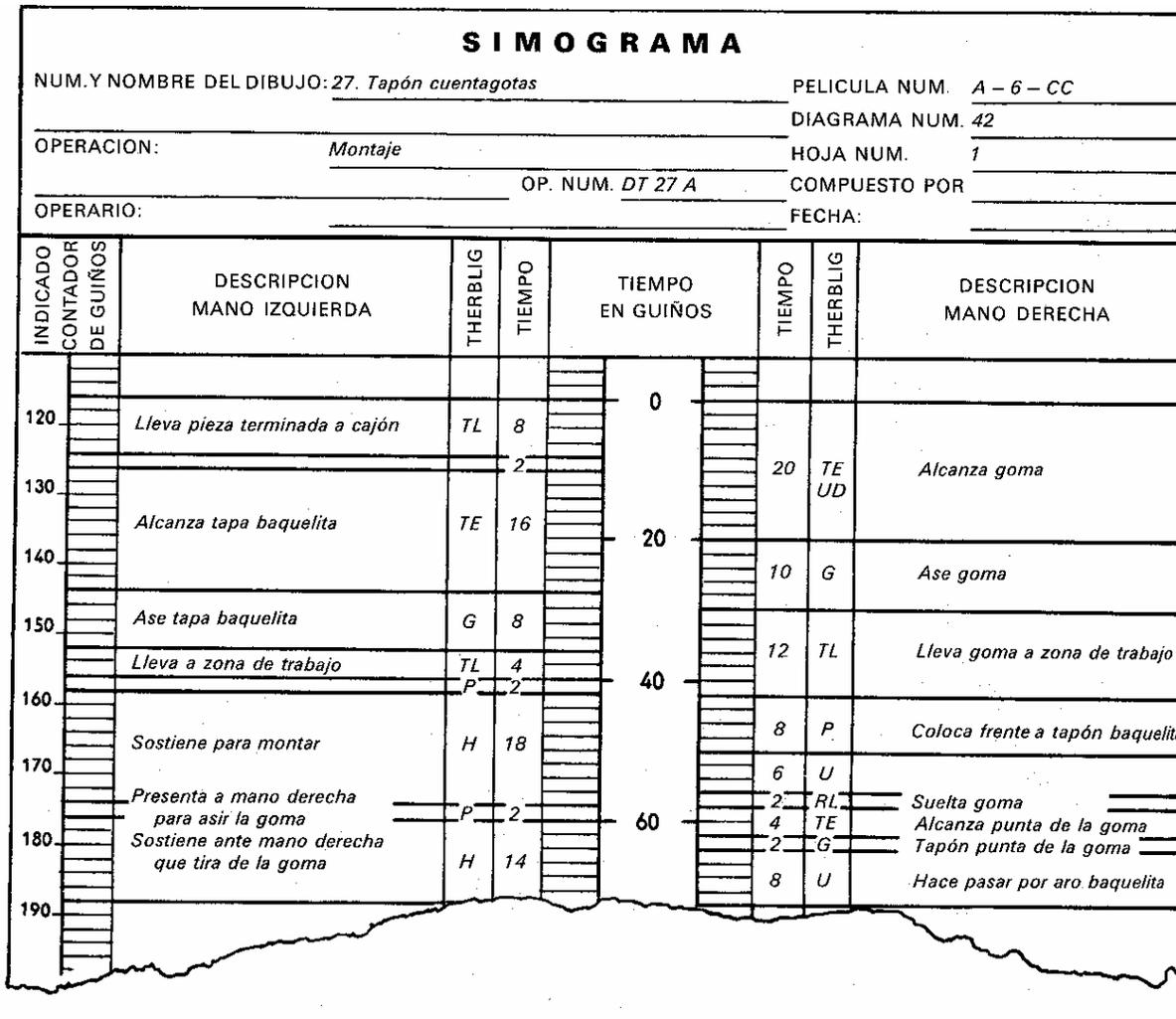
Fuente: OIT, *Introducción al estudio del trabajo*, 3a edición, Ginebra 1980

Trituración de huesos (método original)



Fuente: OIT, Introducción al estudio del trabajo, 3a edición, Ginebra 1980

Simograma

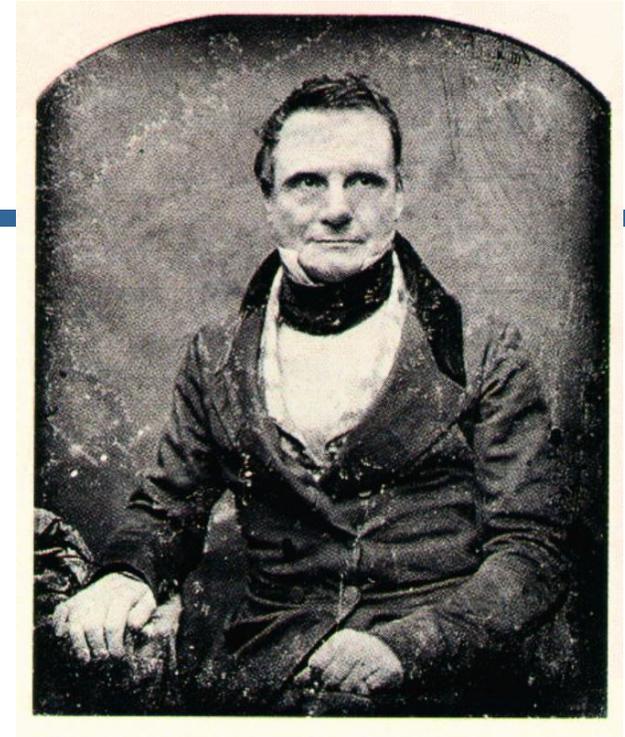


El Método de Descartes

- **“... el primero, no aceptar nunca cosa alguna como verdadera que no la conociese evidentemente como tal, es decir, evitar cuidadosamente la precipitación y la prevención...”**
- **“El segundo, dividir cada una de las dificultades que examinase en tantas partes como fuera posible y como se requiriese para su mejor resolución.”**
- **“El tercero, conducir ordenadamente mis pensamientos, comenzando por los objetos más simples y fáciles de conocer para ascender poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los más complejos...”**
- **“Y el último, hacer en todas partes enumeraciones tan completas y revistas tan generales que estuviese seguro de no omitir nada.”**



Charles Babbage



- **Analizar los procesos y el coste de la producción**
- **Utilizar técnicas de estudio de tiempos**
- **Determinar la mejor manera de hacer preguntas**
- **Iniciar investigación y desarrollo**
- **Utilizar un beneficioso sistema de sugerencias**
- **Utilizar formas impresas estandarizadas para la investigación**
- **Usar el método comparativo para estudiar prácticas de negocios**
- **Estudiar los efectos de los diferentes matices de papel y colores de tinta para determinar cuál es el que menos fatiga la vista**
- **Determinar la demanda a partir de las estadísticas basadas en el ingreso**
- **centralizar os procesos de producción para economizar**
- **Estudiar la localización en planta con respecto a la materia prima.**

Fuente: C. George, Jr., **Historia del pensamiento administrativo**, Ed. Prentice-Hall, 1974

H. Fayol: *Los 14 principios de la teoría administrativa*

- **División del trabajo**
- **Autoridad y responsabilidad**
- **Disciplina**
- **Unidad de mando**
- **Unidad de dirección**
- **Subordinación del interés individual al interés general**
- **Remuneración**
- **Centralización**
- **Cadena de mando**
- **Orden**
- **Equidad**
- **Estabilidad en la permanencia del personal**
- **Iniciativa**
- **Espíritu de equipo**

H. Fayol: *Componentes de la administración*

- **Planificación:** examinar el futuro y elaborar un plan de acción
- **Organización:** construir una estructura material y humana para conseguir los fines.
- **Dirección:** mantenimiento de la actividad entre el personal de la organización.
- **Coordinación:** la cohesión, unificación y armonización de toda la actividad y el esfuerzo.
- **Control:** constatar que todo haya sido efectuado en conformidad con el plan y la dirección establecido.

H. Fayol: *Responsabilidades administrativas del organizador*

- **Asegurarse que el plan está juiciosamente preparado y estrictamente llevado a cabo.**
- **Ver que la organización humana y material sea consistente con los objetivos, recursos y requisitos de la empresa.**
- **Establecer una autoridad única, creativa, enérgica y competente.**
- **Armonizar actividades y coordinar esfuerzos.**
- **Formular decisiones claras, distintas y precisas.**
- **Establecer una eficiente selección de personal.**
- **Definir claramente las funciones.**
- **Estimular el gusto por la iniciativa y la responsabilidad.**
- **Recompensar de manera justa y apropiada los servicios rendidos.**
- **Utilizar sanciones contra fallas y errores.**
- **Vigilar que se mantenga la disciplina.**
- **Asegurar que los intereses individuales sean subordinados al interés general.**
- **Supervisar tanto el orden material como el humano.**
- **Tener todo bajo control.**
- **Luchar contra el exceso de reglas, controles burocráticos y papeleos.**

H. Emerson: *Los 12 principios de la administración*

- 1. Objetivos claramente definidos**
- 2. Sentido común**
- 3. Consejo competente**
- 4. Disciplina**
- 5. Trato justo**
- 6. Registros fiables, inmediatos, adecuados y permanentes**
- 7. Coordinación y despacho**
- 8. Estándares y guías**
- 9. Condiciones estandarizadas**
- 10. Operaciones estandarizadas**
- 11. Instrucciones escritas de la práctica-estándar**
- 12. Recompensa a la eficiencia**

F. W. Taylor: *Principios de la administración*

- **Primero:** Desarrollar una ciencia para cada elemento del trabajo de un hombre lo cual reemplaza a la antigua regla de “a ojo de buen cubero”.
- **Segundo:** Seleccionar científicamente y después entrenar , enseñar y desarrollar al trabajador, mientras que anteriormente el trabajador escogía su propio trabajo y se entrenaba él mismo lo mejor que podía.
- **Tercero:** Cooperar entusiásticamente con los hombres para asegurarse de que el trabajo está siendo desempeñado de acuerdo con los principios de la ciencia desarrollada.
- **Cuarto:** Hay una división casi exactamente igual de la responsabilidad y el trabajo entre la administración y el trabajador. La administración debe tomar todo el trabajo para el cual está mejor capacitada, mientras que en el pasado, casi todo el trabajo y la mayor parte de la responsabilidad eran cargados a los trabajadores.



F. W. Taylor: *Aportaciones*

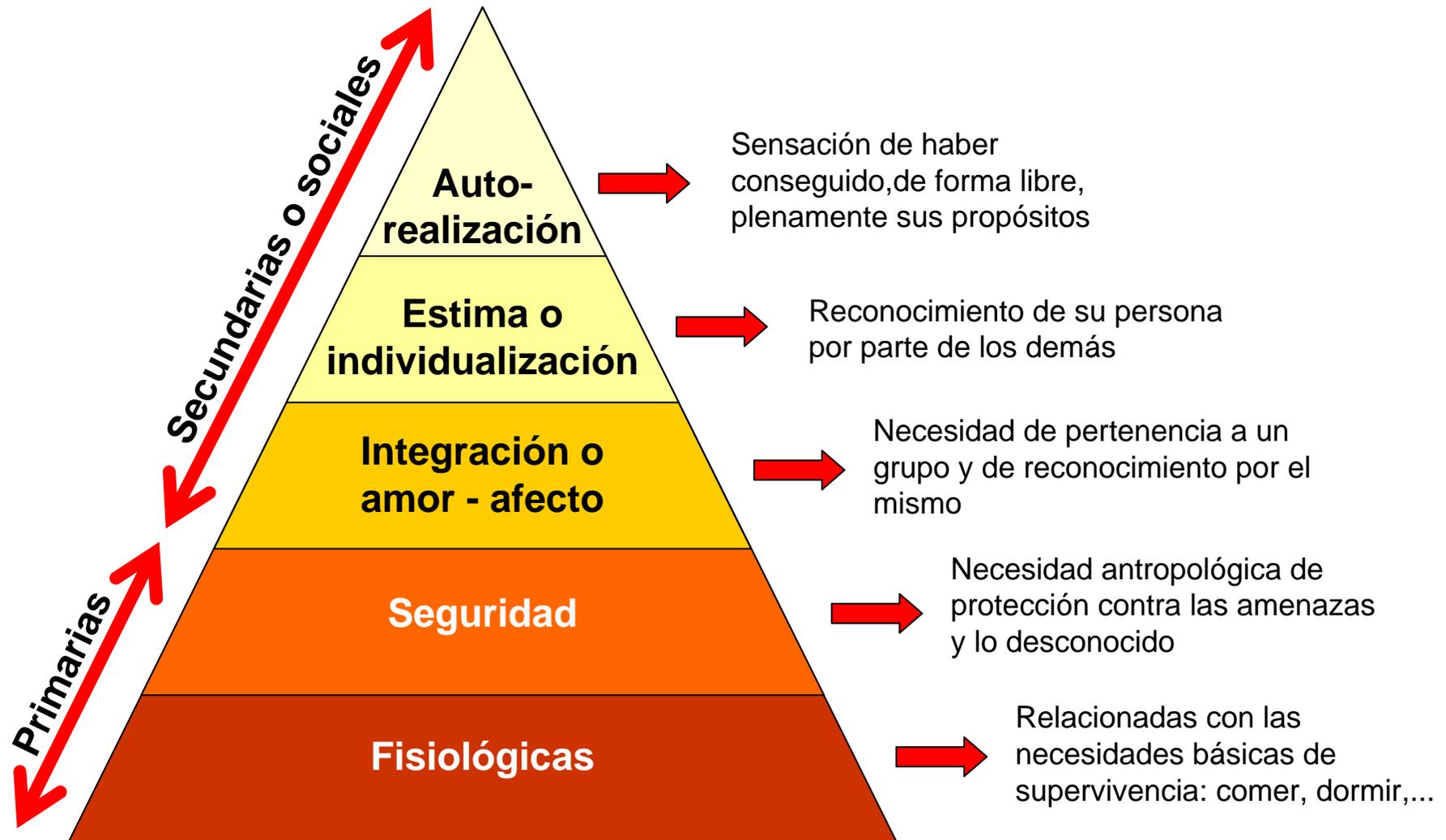
- **Estudios de tiempos, con los instrumentos y métodos para efectuarlos.**
- **Supervisión funcional o dividida y su superioridad sobre la supervisión única antigua.**
- **La estandarización de todas las herramientas e instrumentos utilizados en los oficios y también las acciones o movimientos.**
- **La deseabilidad de un departamento de planificación.**
- **El “principio de excepción” en la administración.**
- **El uso de reglas de cálculo e instrumentos similares para ahorrar tiempo.**
- **Tarjetas de instrucciones para los trabajadores**
- **la idea de tareas en administración, acompañadas por una alta bonificación por la exitosa realización de la tarea.**
- **La “tasa diferencial”.**
- **Sistemas mnemotécnicos para clasificar productos manufacturados**
- **Un sistema de rutas.**
- **Sistemas modernos de costes.**

F. W. Taylor: *Nuevas responsabilidades de los managers*

- **Elaborar una ciencia para la ejecución de cada una de las operaciones de trabajo (en el pasado se usaba el método empírico).**
- **Seleccionar científicamente a los trabajadores, adiestrarlos y formarlos (en el pasado el trabajador elegía el modo de trabajo).**
- **Colaborar cordialmente con los trabajadores para asegurarse que el trabajo se realiza de acuerdo con la ciencia elaborada.**
- **El trabajo y la responsabilidad se reparten entre el manager y los obreros (en el pasado el trabajo y la responsabilidad recaían sobre los trabajadores).**



Pirámide de necesidades de Maslow



“Teoría X” y “teoría Y”

Teoría X

- El hombre común siente aversión al trabajo.
- Hay que obligar, controlar, amenazar y dirigir para hacer trabajar a los hombres.
- El hombre común prefiere ser dirigido, tiene pocas ambiciones y evita las responsabilidades.

Teoría Y

- El trabajo puede producir satisfacción.
- El control y la amenaza no son los únicos medios para obtener trabajo útil.
- La mejor recompensa para el empleado es ver satisfechas sus necesidades egoístas.
- El hombre común acepta y busca responsabilidades.
- El hombre común puede aportar ideas a la organización. Es raro que se aproveche todo su potencial intelectual.

“Nuevas” formas de organización del trabajo

- **Ampliación o extensión horizontal:** asignar a un mismo trabajador un mayor número de elementos de trabajo de la misma naturaleza.
- **Enriquecimiento o extensión vertical:** asignación a un mismo trabajador de tareas de distinta naturaleza (planificación y ejecución, p.e.).
- **Trabajo en grupos:** asignando al grupo parte de la responsabilidad en la organización del trabajo.
- **Rotación de puestos:** ejercicio por parte del trabajador, de modo sucesivo y cíclico, en periodos de duración dada, de diversas funciones.
- **Polivalencia:** evolución de la rotación de puestos donde el trabajador es capaz de realizar un conjunto de funciones y aplica esta capacidad a medida que las circunstancias lo exigen.

Causas de las nuevas formas de organización



- Aumento del nivel de formación de los empleados.
- Cambios tecnológicos en los productos, procesos y en las herramientas de gestión.
- Mayor complejidad de los sistemas productivos, lo que imposibilita el diseño de los métodos *desde el despacho*.
- Cambios en la estructura del mercado (necesidad de flexibilidad, rapidez de respuesta, dinamismo,...).
- Importancia decreciente del trabajo de ejecución respecto al de supervisión, gestión y control.

Principales características del “toyotismo”

- **Flexibilidad completa de la producción. Adaptación diaria al mercado.**
- **Sistema *just in time* de abastecimiento. Estocs cero. Defectos cero. Calidad garantizada.**
- **Flexibilidad de la mano de obra. Trabajo en equipo.**
- **Polivalencia y rotación de los componentes del equipo.**
- **Incremento constante de la intensidad del trabajo. *Management by stress*. Negación de los sistemas de medición de tiempos.**
- **Toma de ideas de los trabajadores. Círculos de calidad.**
- **Canales directos de comunicación trabajador - empresa.**

Aspectos fundamentales del sistema Toyota

- **Subsistema kanban de información y control para lograr un flujo continuo**
- **Alisado de la producción para adaptarla a las fluctuaciones de la demanda**
- **Reducción del tiempo de preparación de las máquinas e instalaciones para disminuir el tamaño de los lotes (SMED)**
- **Estandarización de operaciones para conseguir el equilibrado de la cadena**
- **Distribución en planta compacta con flexibilización de la disposición de la maquinaria**
- **Operarios multifuncionales polivalentes capaces de trabajar en diferentes puestos de trabajo realizando diferentes funciones**
- **Fomento de las iniciativas respecto a mejoras formuladas a través de círculos de calidad**
- **Sistema de control visual para materializar el concepto de autocontrol**
- **Sistema de gestión por funciones**

Enfoque de la investigación operativa

1. Formular el problema
2. Construir un modelo matemático para representar el sistema bajo estudio.
3. Derivar una solución del modelo.
4. Probar el modelo y la solución resultante.
5. Establecer controles sobre la solución.
6. Poner la solución en operación: ejecución.

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i |x - a_i| + \sum_{i=1}^n \omega_i |y - b_i|$$
$$U^* = \text{MAX}_i \left\{ \text{MAX}_j (U_{ij}) \right\}$$
$$Q^* = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{CL}{CS}}$$

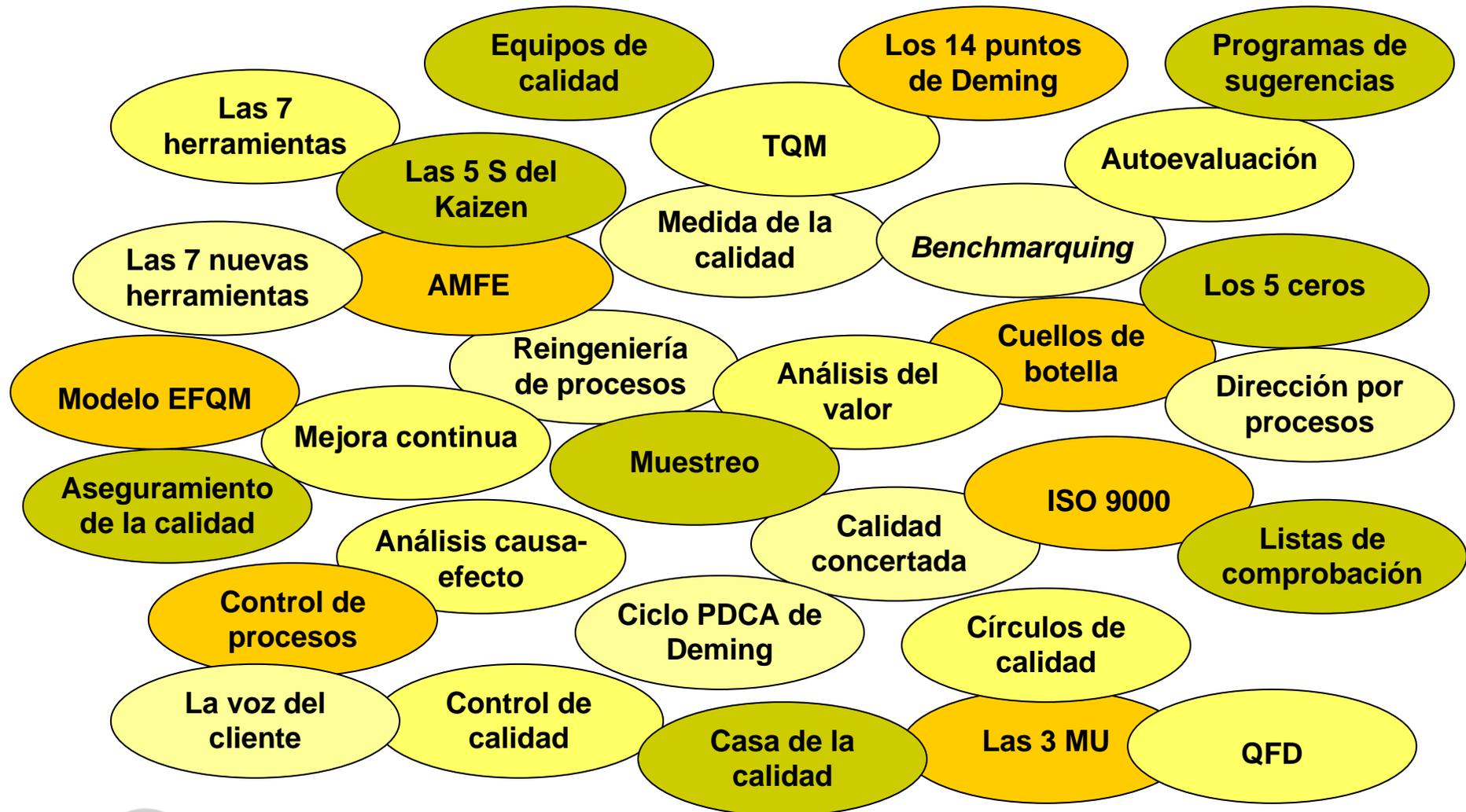
[MAX] $f(x_1, \dots, x_n)$

$$g(x_1, \dots, x_n) \leq b$$

Contribuciones a las técnicas cuantitativas

- **Teoría de la decisión** R. M. Thrall, W. Edwards, C.I. Barnard, C. Hitch, K.J. Arrow, C. W. Churchman, H. A. Simon, N. Wiener
- **Diseño de experimentos** R. A. Fisher, W. G. Cochran, G. M. Cox, M. G. Kendall
- **Teoría de juegos** J. von Neumann, O. Morgenstern, M. Shubik
- **Teoría de la información** C. Shannon, S. Goldman, W. Weaver
- **Control de inventarios** F. W. Harris, T. W. Whitin, J. F. Magee, K. J. Arrow, T. Harris, J. Marschak
- **Programación lineal** L. V. Kantorovich, T. C. Koopmans, W. Leontieff, G. B. Danzig, R. Dorfman, P.A. Samuelson
- **Teoría de probabilidades** R. A. Fisher, T. C. Fry, W. Feller, H. Cramer
- **Teoría de colas** A. K. Erlang, L. C. Edie, P. M. Morse, M. G. Kendall
- **Teoría de reemplazos** G. Terborgh, J. Dean
- **Teoría del muestreo** W. E. Deming, H. F. Dodge, H. G. Romig
- **Teoría de la simulación** C. J. Thomas, W. L. Deemer, R. E. Zimmerman, N. H. Jennings
- **Teoría de la información** A. Wald, E. C. Molina, O.L. Davies, W.A. Sheward, R. Schlaifer
- **Lógica simbólica** G. Boole, A. N. Whitehead, B. Russell, P. F. Strawson, W. E. Cushen

Conceptos de calidad

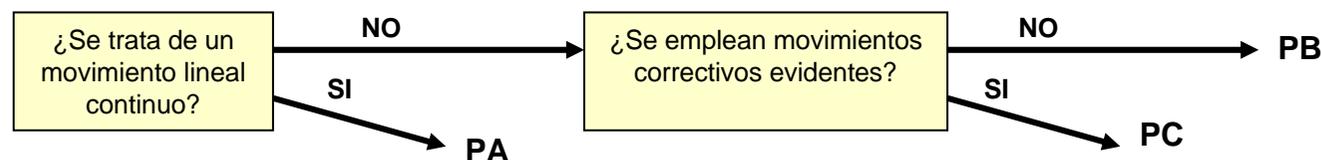


Categorías del MTM-2

■ Recoger	GA	GB	GC
■ Poner	PA	PB	PC
■ Reasir	R		
■ Aplicar presión	A		
■ Emplear los ojos	E		
■ Mover el pie	F		
■ Dar un paso	S		
■ Inclinarsse y levantarse	B		
■ Factores peso	GW	PW	
■ Hacer girar	C		

Poner (P)

- **Poner** es una acción que tiene por finalidad principal trasladar un objeto hasta su destino con la mano
 - ◆ empieza: cuando el objeto está asido y dominado en el lugar inicial
 - ◆ comprende: todos los movimientos de traslado y corrección necesarios para colocar el objeto
 - ◆ termina: con el objeto todavía asido en le lugar previsto
- Se opta entre tres clase de la acción **poner** conforme a las siguientes variables
 - ◆ 1) necesidad de emplear movimientos de corrección
 - ◆ 2) distancia recorrida
 - ◆ 3) peso del objeto o resistencia al movimiento
- La clase **poner** se determina conforme al siguiente modelo de opción:



- ◆ Ejemplo de PA: apartar un objeto
- ◆ Ejemplo de PB: poner una esfera de 12 mm en un agujero de 15 mm de diámetro
- ◆ Ejemplo de PC: introducir una llave yale o similar en una cerradura

Cronometraje

- Tiempo normal representativo de ciclo

$$\bar{x} \pm t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

- Estimación

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}{n-1}$$

- Intervalo de confianza

$$\bar{x} \pm t_{\alpha} \frac{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}}{\sqrt{Nn(n-1)}}$$

- Tamaño de muestra (precisión absoluta: $\pm k$)

$$N \geq \frac{t_{\alpha}^2 \left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \right]}{k^2 n(n-1)}$$

- Tamaño de muestra (precisión relativa: $\pm p$)

$$N \geq \frac{t_{\alpha}^2 n \left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \right]}{p^2 \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 (n-1)}$$

Muestreo del trabajo

- Intervalos de confianza: población y muestra

$$\omega \pm t_{\alpha} \sqrt{\frac{\omega(1-\omega)}{N}}$$

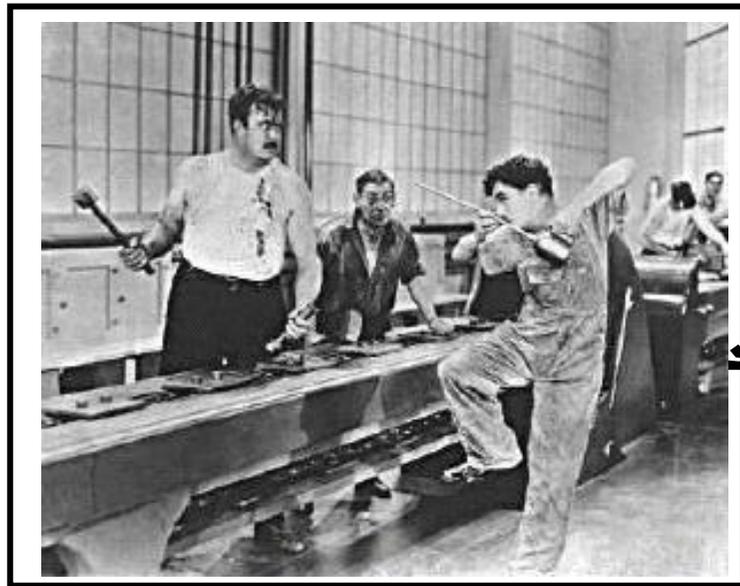
$$\hat{\omega} \pm t_{\alpha} \sqrt{\frac{\hat{\omega}(1-\hat{\omega})}{N}}$$

- Tamaño de la muestra. Precisión absoluta y relativa

$$N \geq \frac{t_{\alpha}^2 \hat{\omega}(1-\hat{\omega})}{k^2}$$

$$N \geq \frac{t_{\alpha}^2 (1-\hat{\omega})}{\hat{\omega} p^2}$$

Programación de Operaciones



DOE

Departament
d'Organització
d'Empreses

Introducción

Funciones de la dirección de operaciones:

- ◆ la planificación de operaciones,
- ◆ el cálculo de necesidades,
- ◆ la programación de operaciones.

- **Cálculo de necesidades:** a partir del plan maestro (planificación), establece las órdenes de trabajo y las órdenes de aprovisionamiento a cumplimentar para alcanzar objetivos del plan:
 - ◆ el artículo a fabricar o aprovisionarse,
 - ◆ la cantidad del mismo,
 - ◆ la fecha de emisión y la **fecha de vencimiento** en la que el artículo es necesario.
- Las órdenes de trabajo: elaboraciones internas del sistema productivo descompuestas en una serie de **operaciones** que constituyen la **ruta** (estándar o no) del artículo. **Cada operación, para su ejecución, precisa de ciertos recursos en una cuantía determinada durante un tiempo también determinado.**
- La disponibilidad de recursos es limitada, restricciones en ejecución de las operaciones (similares a las ligaduras disyuntivas) y en las de realización de las órdenes. **Supondremos que cada operación está asociada a un solo recurso cuya limitación introduce restricciones.**

Introducción (II)

- **Programación de operaciones:** busca definir en forma concreta:
 - ◆ en qué recurso disponible debe ejecutarse cada una de las operaciones necesarias para realizar las órdenes de trabajo emitidas y
 - ◆ los instantes en que debe tener lugar dicha ejecución.
- **Subfunciones de la programación de operaciones :**
 - ◆ la **carga** asigna a cada operación el recurso en que va a ejecutarse.
 - ◆ la **secuenciación** define el orden o secuencia en que se ejecutarán las operaciones asignadas al mismo recurso.
 - ◆ la **temporización** establece las fechas de la ejecución.
- Buenos programas implican:
 - ◆ desarrollo interrelacionado de las tres subfunciones, pero por las dificultades hacen desarrollar habitualmente independientemente carga y secuenciación .
 - ◆ la temporización es imposible desintegrarla de la secuenciación en la mayoría de los casos.

Subfunción de carga



Ejemplo:

operación	CENTROS DE TRABAJO					
	centro A		centro B		centro C	
	horas	índice	horas	índice	horas	índice
1001	90	2,25	40	1	60	1,5
1002	50	3,33	44	2,93	15	1
1003	30	2,5	18	1,5	12	1
1004	24	1	32	1,33	36	1,5
1005	14	2,8	7	1,4	5	1
1006	12	1,33	9	1	18	2
1007	8	1	12	1,5	10	1,25
capacidad	50		47		28	
asignado	42		47		27	

Subfunción de secuenciación

Prototipo de problema de secuenciación: **problema del taller mecánico** (*job-shop problem*):

n **piezas** (lotes de piezas, órdenes de trabajo) deben realizarse en m **máquinas** (recursos, secciones, puestos de trabajo).

La realización de cada pieza implica la ejecución, en orden establecido, de una serie de operaciones prefijadas.

Cada operación está asignada a una de las m máquinas y tiene una duración (tiempo de proceso) determinada y conocida.

Debe establecerse un programa, la secuencia de operaciones en cada máquina y el intervalo temporal de ejecución de las operaciones, con el objetivo de optimizar un índice determinado, que mide la eficiencia del programa.

- **NOTA:** Aunque son problemas en diversos sectores sin la menor relación con la mecánica ni con los talleres, se utilizará sistemáticamente las palabras **pieza** y **máquina** al referirnos a conceptos equivalentes en dichos problemas.

Ejemplo introductorio "Los cuatro amigos"

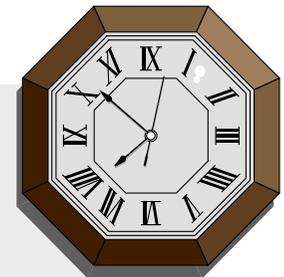
- Cuatro amigos, Alex (A), Blas (B), Carles (C) y David (D) comparten el mismo apartamento. Los domingos reciben cuatro periódicos: La Vanguardia (LV), El País (EP), El Periódico de Cataluña (PC) y Sport (SP).
- Los periódicos llegan a primera hora de la mañana y están disponibles cuando el primero de los cuatro se levanta.
- Leen los periódicos en un orden preestablecido y durante un tiempo prácticamente fijo.
- Son tan maniáticos que esperan a que el periódico que corresponde a su próxima lectura quede disponible sin leer nada aun cuando esté libre otro periódico que no han leído.
- Los tiempos de lectura no se alteran por el hecho que se afeiten, duchen, preparen y consuman su desayuno, se vistan, etc.
- Hasta que no han leído los cuatro periódicos no abandonan el apartamento.



Ejemplo "Los cuatro amigos" (II)

- Los datos de las lecturas se concretan a continuación:
 - ◆ Alex se levanta a las 8:00 horas y lee primero La Vanguardia durante 40 minutos, seguida de El Periódico durante 30, El País durante 40 y Sport durante 10.
 - ◆ Blas se levanta a las 8:10 horas y lee EP durante 45 minutos, LV durante 30, SP durante 15 y PC durante 20.
 - ◆ Carles se levanta a las 8:20 horas y lee PC durante 35 minutos, LV durante 35, SP durante 20 y EP durante 10.
 - ◆ David se levanta a las 8:30 horas y lee SP durante 45 minutos, EP durante 15, LV durante 15 y PC durante 15.

¿Cómo deben programar las lecturas para terminar las lecturas de los periódicos lo antes posible y poder salir en grupo a pasear?



Ejemplo "Los cuatro amigos" (III)

Una posible solución:

	LV	EP	PC	SP
A	8:00 – 8:40	9:30 – 10:10	8:55 – 9:25	10:10 – 10:20
B	9:45 – 10:15	8:10 – 8:55	10:35 – 10:55	10:20 – 10:35
C	8:55 – 9:30	10:10 – 10:40	8:20 – 8:55	9:30 – 9:45
D	9:30 – 9:45	9:15 – 9:30	9:45 – 10:00	8:30 – 9:15

A termina a las 10:20 (de los 140 minutos de plazo ocupa 120 en lectura).

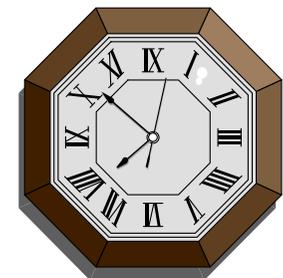
B termina a las 10:55 (de los 165 minutos de plazo ocupa 110 en lectura).

C termina a las 10:40 (de los 140 minutos de plazo ocupa 100 en lectura).

D termina a las 10:00 (ha ocupado los 90 minutos de plazo en lectura).

Los cuatro amigos podrán salir a las 10:55

NOTA: Este programa no es óptimo respecto al criterio fijado (terminar todas las lecturas lo antes posible).



El problema del taller mecánico: clasificación (I)

Problema estático:

- ◆ Las piezas en número finito y determinado deben realizarse en un taller con un número finito de máquinas.
- ◆ En el instante de realizar la programación se conoce la ruta de cada pieza, las operaciones que la componen, en que máquina debe realizarse cada operación y su duración correspondiente.
- ◆ Todas las piezas y máquinas están disponibles en el mismo instante que habitualmente se adoptará como inicial o instante 0 en tiempo relativo.
- ◆ Finalidad del problema: buscar un programa que optimice un índice de eficiencia establecido, por ejemplo la ocupación total del taller.

El problema del taller mecánico: clasificación (II)

Problema semidinámico:

- ◆ Las piezas en número finito y determinado deben realizarse en un taller con un número finito de máquinas.
- ◆ En el instante de realizar la programación es conocida la ruta de cada pieza, las operaciones que la componen, en que máquina debe realizarse cada operación y la duración correspondiente.
- ◆ Los instantes de disponibilidad de las piezas y/o máquinas pueden no ser idénticos, pero sí conocidos, en el instante de realizar la programación.
- ◆ Finalidad del problema: buscar un programa que optimice un índice de eficiencia adecuado.

El problema del taller mecánico: clasificación (III)

Problema dinámico:

- ◆ Horizonte de funcionamiento del taller: **ilimitado hacia el futuro**. El número de piezas, no el de máquinas, es también ilimitado. Todas las piezas a tratar en el futuro no están definidas en un momento determinado; la definición de las piezas se conocerá **progresivamente** a medida que va transcurriendo el tiempo. Una pieza queda definida por completo cuando la orden se emite o llega al taller (o anteriormente justo antes de la llegada efectiva).
- ◆ Progresivamente, algunas piezas terminan su elaboración en el taller y lo abandonan, siendo substituidas por otras nuevas que llegan para ser elaboradas.
- ◆ Un único programa no es suficiente: su validez queda en entredicho al transcurrir el tiempo y alterarse la situación; deben establecerse **ciclos de reprogramación**.
- ◆ Finalidad en este caso: establecer un procedimiento de programación, y juzgar la calidad de un procedimiento; los índices de eficiencia se asocian a las características medias de los programas a lo largo de un **intervalo temporal suficiente**.

Hipótesis de Conway, Maxwell y Miller (1967)

- Cada máquina esta disponible continuamente desde un instante, $f \geq 0$, hasta T , con T arbitrariamente grande.
- En las rutas de las piezas no se producen convergencias (montajes) ni divergencias (partición en lotes). Cada operación tiene una sola operación precedente inmediata (exceptuada la primera operación de cada pieza) y una sola operación siguiente inmediata (exceptuada la última operación de cada pieza).
- Cada operación puede ejecutarse en un solo tipo de máquina del taller.
- Sólo hay una máquina de cada tipo en el taller.
- Cuando una operación ha comenzado no se admiten interrupciones.
- No pueden solaparse dos operaciones de la misma pieza (en la misma máquina o en máquinas distintas).
- Cada máquina puede ejecutar una sola operación a la vez.
- La única restricción activa en el taller es relativa a las máquinas.

No asumiremos al pie de la letra las hipótesis CMM que únicamente describen problemas estáticos.

El problema de Taller Mecánico: Nomenclatura (I)

n / m / A / B

n: número de piezas,

m: número de máquinas,

A: tipo de flujo,

- F: flujo regular (*flow-shop*).

- P: flujo regular con la misma secuencia en todas las máquinas.

- G: flujo general.

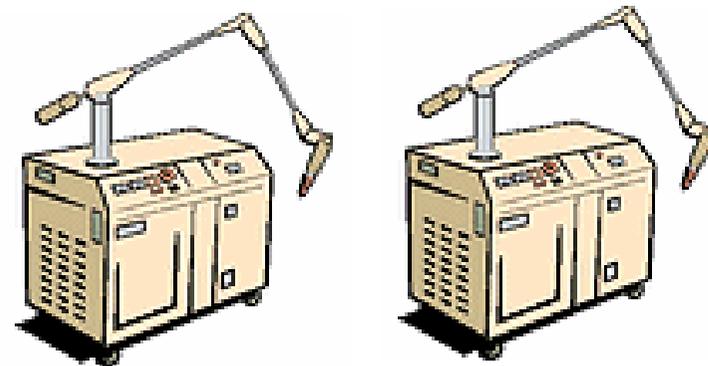
B: índice de eficiencia,

- F_{\max}

- C_{\max}

- T_{med}

- T_{\max}, \dots



El problema de Taller Mecánico: Nomenclatura (II)

- r_i : instante de entrada de la pieza i en el taller.
- d_i : fecha de vencimiento de la pieza i .
- g_i : número de operaciones de la pieza i .
 - ◆ $m_{k,i}$: máquina para la operación k de la pieza i .
 - ◆ $p_{k,i}$: duración de la operación k de la pieza i .
- a_i : tiempo concedido para la realización de la pieza i .
- $w_{k,i}$: tiempo de espera de la operación k de la pieza i .

$$p_i = \sum_{k=1}^{g_i} p_{k,i}$$

$$w_i = \sum_{k=1}^{g_i} w_{k,i}$$

- c_i : instante de salida de la pieza i
- F_i : tiempo de permanencia de la pieza i

$$c_i = r_i + w_i + p_i$$
$$F_i = c_i - r_i = w_i + p_i$$

El problema de Taller Mecánico: Nomenclatura (III)

- L_i : huelgo $L_i = c_i - d_i$
- T_i : retraso $T_i = \max \{ L_i, 0 \}$
- E_i : adelanto $E_i = \max \{ -L_i, 0 \}$

medidas de eficiencia

$$C_{\max} = \text{MAX} \{ c_i \} ; F_{\max} = \text{MAX} \{ F_i \} ; T_{\max} = \text{MAX} \{ T_i \}$$

$$F_{\text{med}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_i ; T_{\text{med}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_i$$

Una medida de eficiencia es *regular* si no disminuye (no mejora) cuando alguno o todos los valores c_i aumentan.

Relación entre tiempo de permanencia de las piezas y su stock

- Sea $N(t)$ el número de piezas presentes en el taller en el instante t , el **stock medio** o **número medio de piezas** en el intervalo (t_0, t_1) será:

$$N_{\text{med}}(t_0, t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \int_{t_0}^{t_1} N(t) \cdot dt$$

- Caso estático:

$$\frac{N_{\text{med}}(0, F_{\text{max}})}{n} = \frac{F_{\text{med}}}{F_{\text{max}}}$$

- Caso dinámico: se establece la relación referida a un intervalo ilimitado $(0, \infty)$ a condición de haber alcanzado el **estado de régimen permanente** (fórmula de Little):

$$N_{\text{med}} = \lambda * F_{\text{med}}$$

λ es la tasa de llegada de piezas al taller (número de piezas por unidad de tiempo), y, dado el estado de régimen permanente, también la tasa de salida.

Secuencias finitas para una máquina

■ Datos:

- ◆ $m = 1 ; g_i = 1 ; p_i = p_{1,i} ; w_i = w_{1,i} \Rightarrow$ Hay $n!$ soluciones posibles (potencialmente)
- ◆ Si además $r_i = 0 \Rightarrow a_i = d_i ; c_i = F_i = w_i + p_i ; F_{\max} = \sum_{i=1}^n p_i$
- ◆ Llamaremos $[k]$ la pieza que ocupa la k -ésima posición en la permutación:

$$c_{[1]} < c_{[2]} < \dots < c_{[n]}$$

1. Secuencia conforme a la duración o **SPT** (*Shortest Processing Time*):

$$p_{[1]} \leq p_{[2]} \leq \dots \leq p_{[n]}$$

- ◆ Corresponde a la regla heurística: “ejecutar primero la operación más corta”.

**El programa activo asociado a esta secuencia minimiza F_{med} ,
y también minimiza el stock medio.**

Secuencias finitas para una máquina (II)

2. Secuencia conforme a la fecha de vencimiento o **EDD** (*Earliest Due Date*):

$$d_{[1]} \leq d_{[2]} \leq \dots \leq d_{[n]}$$

- ◆ Corresponde a la regla heurística: “ejecutar primero lo más urgente”.
- ◆ El programa activo asociado a esta secuencia minimiza T_{\max} y L_{\max} (Jackson, 1955).

3. Secuencia conforme al margen o **SFT** (*Shortest Float Time*):

$$d_{[1]} - p_{[1]} \leq d_{[2]} - p_{[2]} \leq \dots \leq d_{[n]} - p_{[n]}$$

- ◆ Corresponde a la regla heurística: “ejecutar primero lo que tiene menos margen”.
- ◆ Puede demostrarse que el programa activo asociado a esta secuencia maximiza T_{\min} (y L_{\min}).

Secuencias finitas para una máquina (III)

- **Secuencias SPT, EDD y SFT** en un ejemplar 8/1//
(cuyos datos se encuentran en la tabla adjunta):

i	1	2	3	4	5	6	7	8
pi	8	3	6	2	7	9	4	5
di	15	20	21	27	29	33	39	42
di - pi	7	17	15	25	22	24	35	37

Secuencia SPT

k	1	2	3	4	5	6	7	8
[k]	4	2	7	8	3	5	1	6
c[k]	2	5	9	14	20	27	35	44
d[k]	27	20	39	42	21	29	15	33
L[k]	-25	-15	-30	-28	-1	2	20	11

Secuencia EDD

k	1	2	3	4	5	6	7	8
[k]	1	2	3	4	5	6	7	8
c[k]	8	11	17	19	26	35	39	44
d[k]	15	20	21	27	29	33	39	42
L[k]	-7	-9	-4	-8	-3	2	0	2

Secuencias finitas para una máquina (IV)

Secuencia SFT

k	1	2	3	4	5	6	7	8
[k]	1	3	2	5	6	4	7	8
c[k]	8	14	17	24	33	35	39	44
d[k]	15	21	20	29	33	27	39	42
L[k]	-7	-7	-3	-5	0	8	0	2

Secuencia cualquiera

k	1	2	3	4	5	6	7	8
[k]	1	3	2	5	4	6	7	8
c[k]	8	14	17	24	26	35	39	44
d[k]	15	21	20	29	27	33	39	42
L[k]	-7	-7	-3	-5	-1	2	0	2

Parámetros característicos

	Fmed	Tmax	Tmed	Lmin	Lmed	$\sum |L_i|$
SPT	19,5	21	3,875	-30	-8,75	132
EDD	24,875	2	0,5	-9	-3,375	35
SFT	26,75	8	1,25	-7	-1,5	32
X	25,875	2	0,5	-7	-2,375	27

Flow-shop : Problema $n/m/F/F_{\max}$

Ejemplar (si todas las piezas y máquinas disponibles en el instante 0): matriz $[m \times n]$.

■ Lemas de Johnson (1954):

- ◆ **Lema 1:** En un problema $n/m/F$ con todas las piezas y máquinas disponibles simultáneamente y una medida de eficiencia regular, siempre existe un programa óptimo en el que las piezas tienen la misma secuencia en las dos primeras máquinas, por tanto los programas considerados en la búsqueda de un programa óptimo pueden limitarse a los de este tipo,
- ◆ **Lema 2:** En un problema $n/m/F/F_{\max}$ con todas las piezas y máquinas disponibles simultáneamente, siempre existe un programa óptimo en el que las piezas tienen la misma secuencia en las dos últimas máquinas, por tanto los programas considerados en la búsqueda de un programa óptimo pueden limitarse a los de este tipo.

Si $m = 2$ o $m = 3$, la medida de eficiencia es F_{\max} (regular), con las piezas y máquinas disponibles en el instante 0: existe un **programa óptimo** con la secuencia de piezas mantenida en todas las máquinas.

Determinación de un programa óptimo: búsqueda de **una permutación de las n piezas** (no descarta programas óptimos de otro tipo, secuencias no idénticas en todas las máquinas).

Flow-shop : Problema $n/2/F/F_{\max}$

- **Johnson** enunció la siguiente condición, suficiente para que una permutación sea óptima:

“Para todo par de piezas, h e i , tal que
$$\min \{ p_{1,h} , p_{2,i} \} < \min \{ p_{2,h} , p_{1,i} \}$$
 h ocupa una posición anterior a la de i en la permutación.”

- **Algoritmo de Johnson:**

Paso 1: Se busca la menor de las duraciones de las piezas no ordenadas todavía, $p_{j,i}$; en caso de empate, se elige cualquiera de ellas.

Paso 2: Si $j = 1$ la pieza i se coloca delante de todas las no ordenadas; si $j = 2$ se coloca detrás de las mismas.

Paso 3: Se marca la pieza i como ordenada; si quedan piezas por ordenar, se vuelve al **paso 1**, y en caso contrario, **FIN (permutación obtenida)**.

Flow-shop : Ejemplo 5/2/F/F_{max}

Datos:

j\i	1	2	3	4	5
1	8	2	4	3	5
2	4	6	1	4	7

Orden de Johnson:

2 – 4 – 5 – 1 – 3.

- **Cálculo de F_{max}.** Sea [k] la pieza situada en la posición k de la permutación y f_j(k) el instante en que termina la k-ésima operación en la máquina j:

- ◆ $f_j(k) = \max \{ f_{j-1}(k) , f_j(k-1) \} + p_{j,[k]} \quad j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$
- ◆ valores iniciales: $f_0(k) = 0 \quad \forall k$ y $f_j(0) = 0 \quad \forall j$
- ◆ $F_{\max} = f_m(n)$.

k	1	2	3	4	5
[k]	2	4	5	1	3
f ₁ (k)	2	5	10	18	22
f ₂ (k)	8	12	19	23	24

Flow-shop : Algoritmo de Johnson generalizado

- **Condición de Johnson generalizada:** una secuencia la cumple si

Para todo par de piezas, **h** e **i**, tal que

$$\min \{ p_{1,h} , p_{2,i} \} < \min \{ p_{2,h} , p_{1,i} \} \quad \text{o bien}$$

$$\min \{ p_{1,h} , p_{2,i} \} = \min \{ p_{2,h} , p_{1,i} \} \quad \text{y} \quad p_{1,h} - p_{2,h} < p_{1,i} - p_{2,i}$$

h ocupa una posición anterior a la de **i** en la permutación.

- **Algoritmo de doble ordenación:**

1: Construir una secuencia cualquiera de las n piezas.

2: Mientras se produzcan cambios de orden:

2.1: poner a cero el contador de cambios de orden

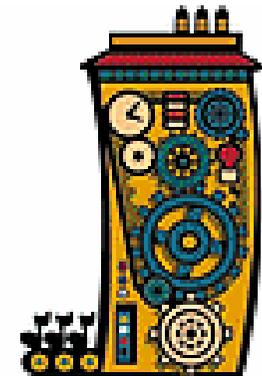
2.2: recorrer la secuencia haciendo $k = 1, 2, \dots, n-1$

2.3: hacer $h = [k], i = [k+1]$

2.4: si $\min \{ p_{1,h} , p_{2,i} \} > \min \{ p_{2,h} , p_{1,i} \}$ o $\min \{ p_{1,h} , p_{2,i} \} = \min \{ p_{2,h} , p_{1,i} \}$ y $p_{1,h} - p_{2,h} > p_{1,i} - p_{2,i}$
hacer $[k] = i, [k+1] = h$; anotar un cambio de orden

2.5: pasar al siguiente valor de k

Fin mientras



Flow-shop :

Algoritmo de Johnson generalizado (II)

- **Johnson** extendió su algoritmo a problemas $n/3/F/F_{\max}$ cuando la segunda máquina es poco importante:
Si $\min_i \{ p_{1,i} \} \geq \max_i \{ p_{2,i} \}$ o bien $\max_i \{ p_{2,i} \} \leq \min_i \{ p_{3,i} \}$
- Una permutación óptima puede encontrarse aplicando el algoritmo de Johnson a un problema con 2 máquinas “ficticias” cuyos tiempos de proceso sean $(p_{1,i} + p_{2,i} ; p_{2,i} + p_{3,i})$.
- El mismo esquema es válido con 2 máquinas y un tiempo de latencia q_i intermedio, la permutación óptima se obtiene aplicando el algoritmo de Johnson a: $(p_{1,i} + q_i ; p_{2,i} + q_i)$.
- Ecuaciones recurrentes:
 - ◆ $f_1(k) = f_1(k-1) + p_{1,[k]} ; f_2(k) = \max \{ f_1(k) + q_{[k]} , f_2(k-1) \} + p_{2,[k]}$
 - ◆ Resultado utilizado en la cota de Nabeshima.

Heurísticas de Palmer y Trapecios

- **Índices (estáticos)** asociados a las piezas:

$$S_{1,i} = \sum_{j=1}^m (m-j) \cdot p_{j,i} \quad S_{2,j} = \sum_{j=1}^m (j-1) \cdot p_{j,i} \quad S_{3,i} = S_{1,i} - S_{2,i}$$

Palmer (1965) propone ordenar las piezas en orden creciente de $S_{3,i}$.

Trapecios (1966) propone ordenar las piezas aplicando el algoritmo de Johnson a las parejas $(S_{1,i}, S_{2,i})$.

- ◆ Se propone aplicar ambas heurísticas y adoptar la permutación cuyo valor de F_{\max} sea menor.
- ◆ Para desempatar se propone utilizar para desempatar el criterio alternativo (si aplicamos trapecios, desempatamos con Palmer y viceversa), y en caso de subsistir empate, dar prioridad a la pieza con menor valor $p_{1,i}$

Heurística de Gupta

- **Gupta (1971):** índice (estático) para cada pieza:

$$S_{4,i} = \frac{x(i)}{\text{MIN}_{1 \leq j \leq m-1} \{p_{j,i} + p_{j+1,i}\}}$$

$x(i) = 1$ si $p_{1,i} \geq p_{m,i}$; en los demás casos $x(i) = -1$

- La permutación se obtiene ordenando las piezas en orden creciente de $S_{4,i}$
 - ◆ Resolver los empates a favor de la pieza cuya suma de duraciones en todas las máquinas sea menor (aunque este criterio de desempate no parece el mejor en la gran mayoría de los casos y proponemos la utilización de Palmer o trapecios como regla adicional).
 - ◆ Esta heurística da el mismo resultado que el algoritmo de Johnson para $m=2$.