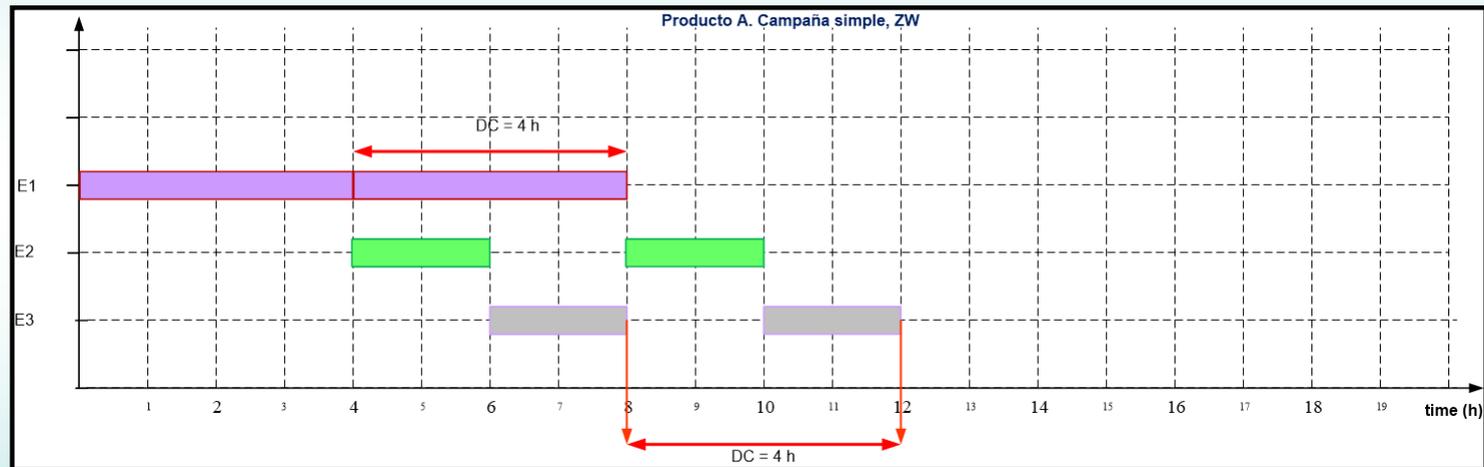


Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química



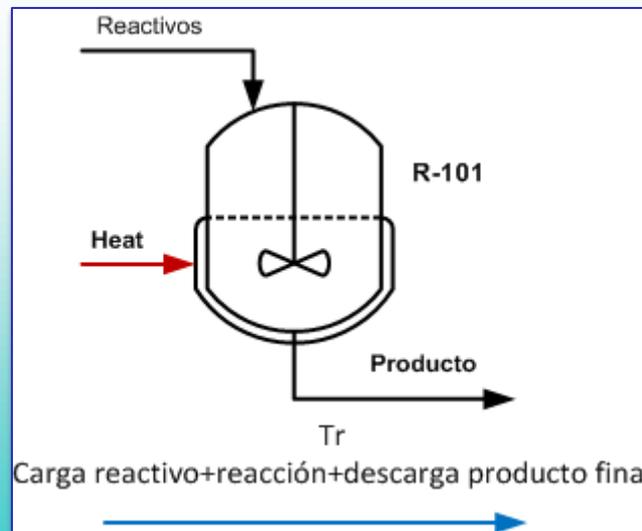
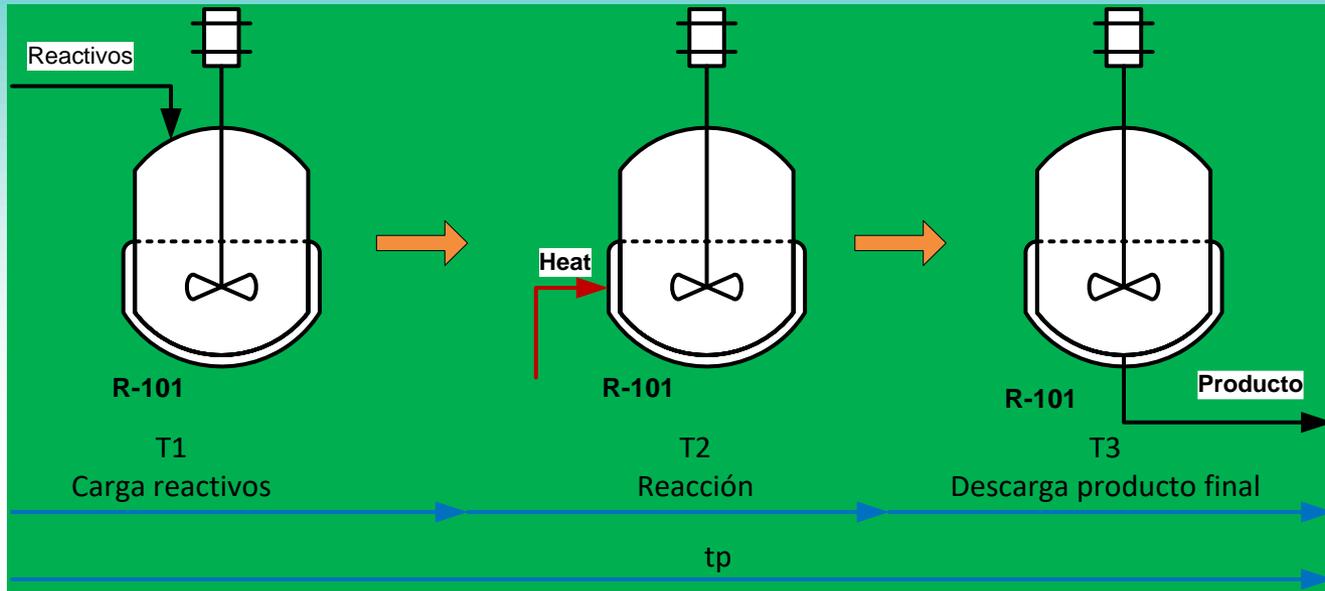
Procesos Batch

Batch vs. Continuos

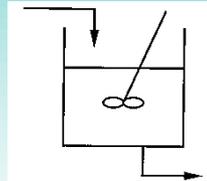
Variables a considerar:

- Tamaño
 - Batch < 500 t/año $\sim 1,5$ t/día
(< 2 m³ de liquido o solido por día)
 - Continuo > 5.000 t/año
- Flexibilidad
 - Batch puede manejar diferentes alimentaciones y producir diferentes productos.
 - Continuos es mejor para pocos productos y pocas alimentaciones.

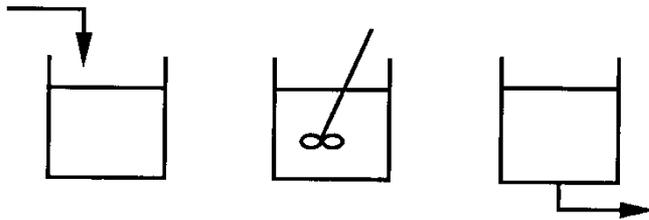
Batch vs. Continuo



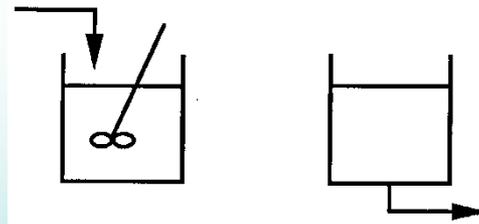
¿Procesos continuos o Batch?



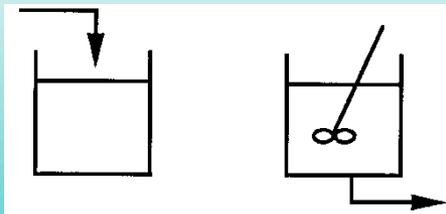
Continuo



Batch

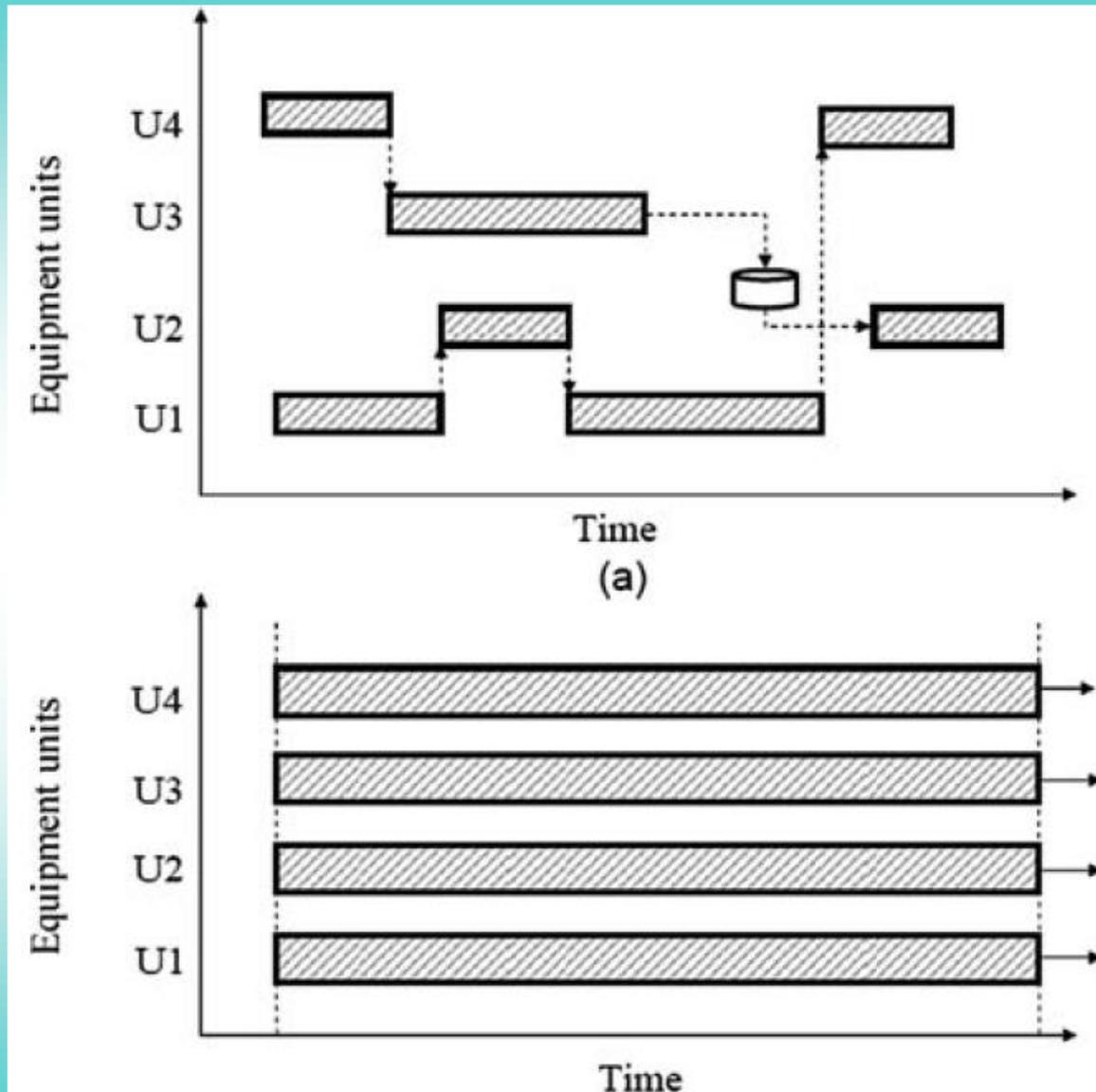


Alimentación batch



Salida de producto Batch

Batch vs. Continuous



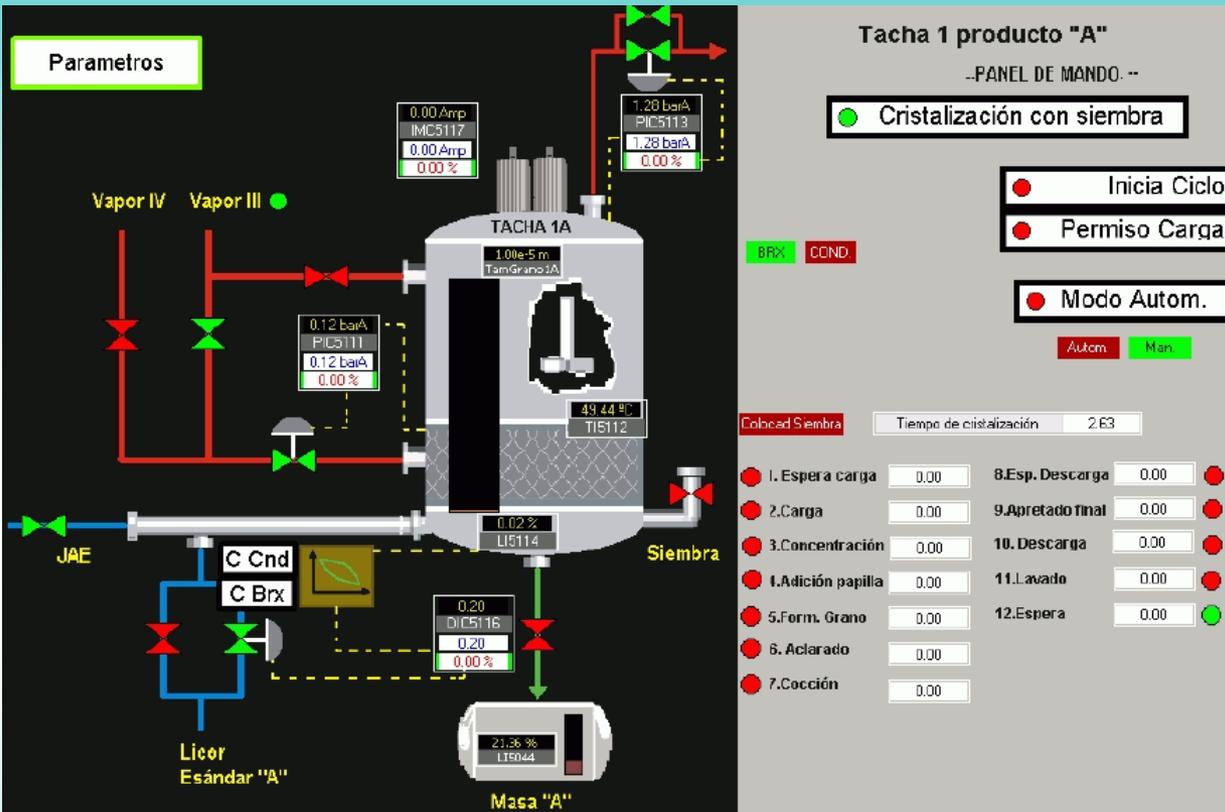
Plantas batch

- A medida que la fabricación de productos de alto valor agregado (químicos, farmacéuticos, alimentos, ciertos polímeros...) y producción limitada va generalizándose, tiene mas interés la fabricación en forma *batch*.
- Cuando se tiene creciente interés el reutilizar los equipos para fabricar distintos productos, dando lugar a fábricas flexibles multiproducto situadas cerca de los lugares de consumo.
- Esto plantea dos problemas:
 - La operación de cada unidad batch
 - Planificar y secuenciar la producción tomando la decisión qué productos se procesan, en qué equipos, en qué orden y los tiempos de inicio y fin de cada proceso.

Selección de procesos discontinuos

- Flujo de Producción (pequeña escala).
- Fuerzas de Mercado (demanda temporal).
- Operación Flexible (múltiples productos).
- Problemas Operacionales (limpieza, síntesis compleja, control estricto, etc.).
- Uso Optimo de Recursos.
- Integración de Operaciones y Actividades.
- Equipos Multifuncionales.

Unidades batch



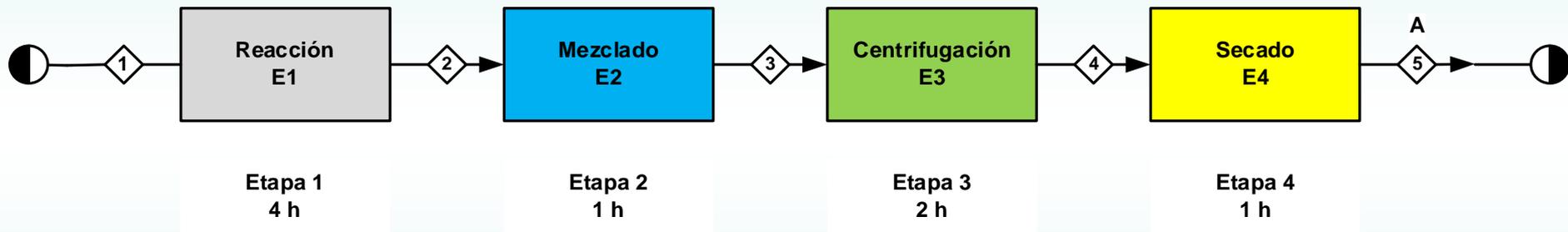
- Operación
- Carga
- Secuencia de operaciones internas en la unidad
- Descarga

- Receta para cada unidad
- Se tienen problemas de control

Cuando se considera un conjunto de unidades *batch*, el problema fundamental es saber cuando arrancar y descargar cada lote, de forma que se procese un determinado flujo de productos y se satisfagan las restricciones de energía, calidad, almacenamiento, control, etc.

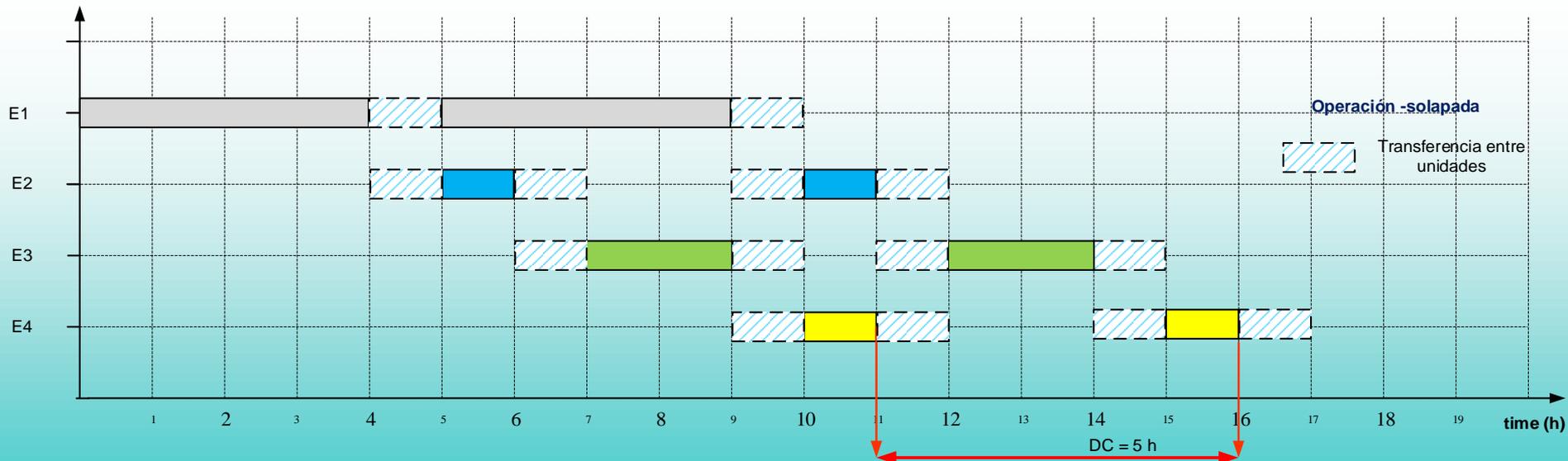
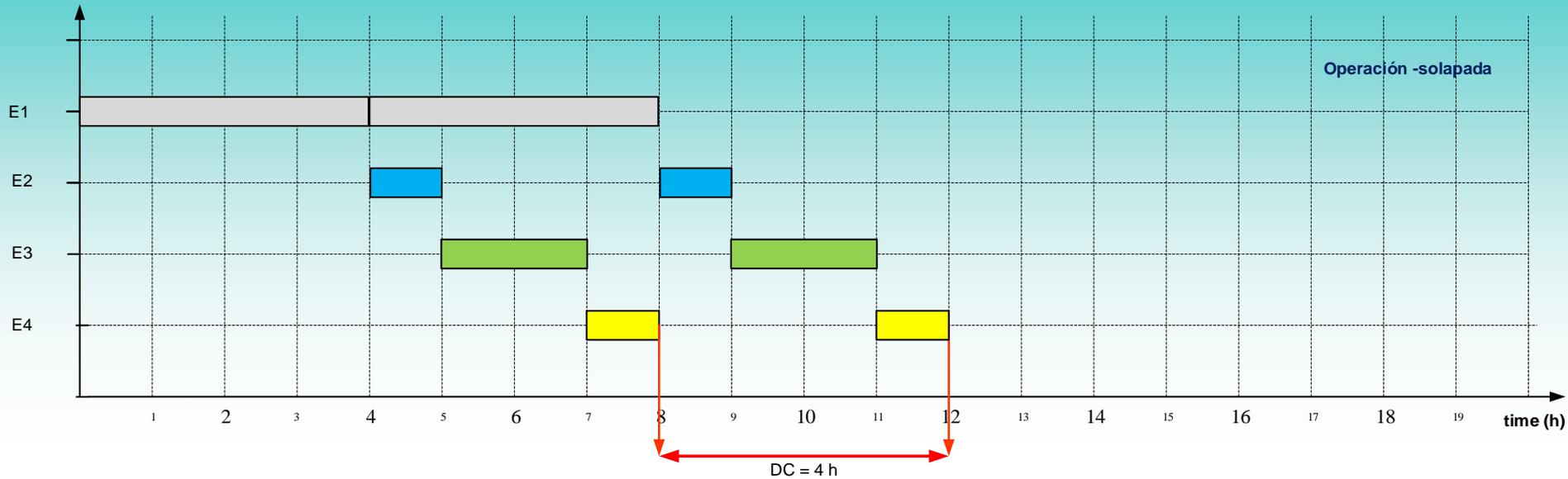
Producción de un solo producto (monoproducto)

Normalmente, la fabricación de un producto implica varias etapas que se llevan a cabo secuencialmente en varios equipos de acuerdo a una receta de fabricación.

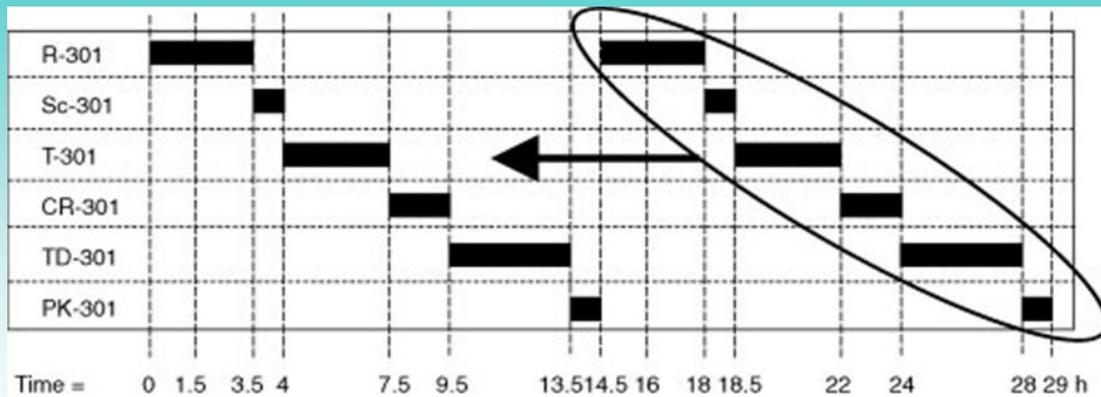


En el ejemplo, la fabricación del producto A implica cuatro etapas sucesivas empleando en cada una los tiempos indicados (cada etapa en una unidad de proceso).

Producción de un solo producto (monoproducto)

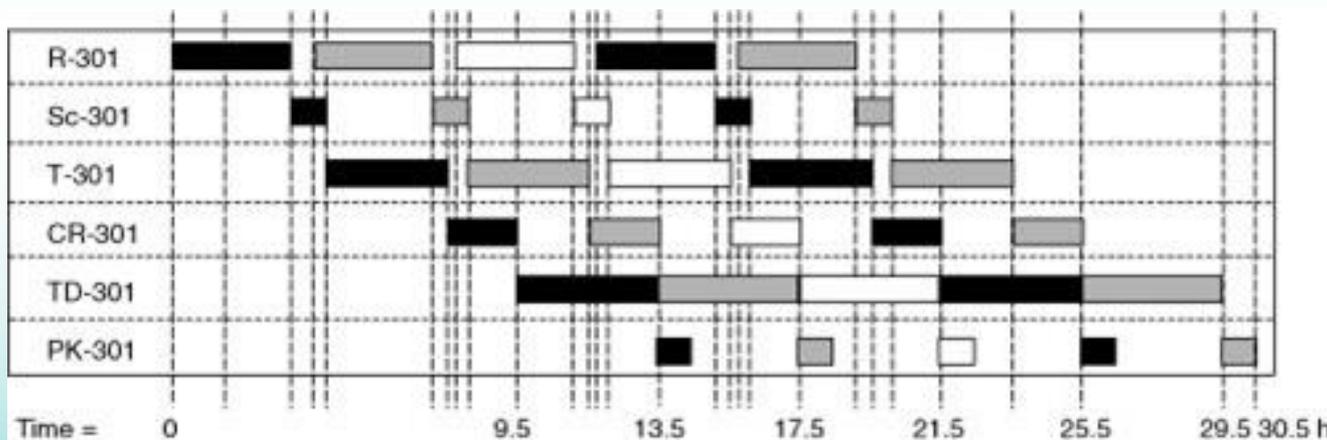


Procesos Batch. Scheduling



$$T_{NO} = n \sum_{i=1}^m t_i$$

$$t_{ciclo,NO} = \frac{T_{NO}}{n} = \frac{n \sum_{i=1}^m t_i}{n} = \sum_{i=1}^m t_i$$



$$t_{ciclo} = \frac{\text{tiempo total}}{\text{número de lotes}}$$

$$T_O = T = (n-1) \max_{i=1, \dots, m} (t_i) + \sum_{i=1}^m t_i \quad t_{ciclo,O} = \frac{T}{n} = \frac{(n-1) \max_{i=1, \dots, m} (t_i) + \sum_{i=1}^m t_i}{n}$$

$$t_{ciclo} \cong \max_{i=1, \dots, m} (t_i)$$

Procesos batch

- En los últimos tiempos existe una marcada tendencia a utilizar procesos discontinuos en la industria química.
- Sus características principales son:
 - **Volumen de producción relativamente bajo.**
 - **Un mismo equipo puede ser usado para distintos procesos o productos.**
 - **Flexibilidad para incorporar nuevos productos.**
- Esta flexibilidad introduce grandes dificultades en el modelado y solución de los problemas de diseño:
 - **Definición y secuencia de tareas.**
 - **Asignación de equipos a tareas.**
 - **Decisión sobre número y dimensiones de equipos.**

Procesos batch

- Estos son estudiados por la ***Investigación de Operaciones***.
- Sin embargo, las plantas de procesos químicos presentan diferencias:
 - **Almacenamiento de productos intermedios y producto final.**
 - **Productos inestables que requieren tratamiento inmediato.**
 - **Procesos controlados por equilibrio o cinética que dependen de las condiciones de operación.**
- Estas características hacen más complejos los problemas y las soluciones de IO no pueden aplicarse directamente.

Procesos batch

- Las características de los procesos batch requieren establecer un **programa** de producción.
- Un programa consiste en determinar:
 - **El orden de los procesos de elaboración de cada producto.**
 - **La asignación de tiempos a cada etapa.**
 - **La asignación de equipos a cada proceso.**
 - **El orden de elaboración de los distintos productos.**
 - **La determinación de una política de almacenamientos intermedios.**
- Los dos primeros puntos determinan **una receta.**

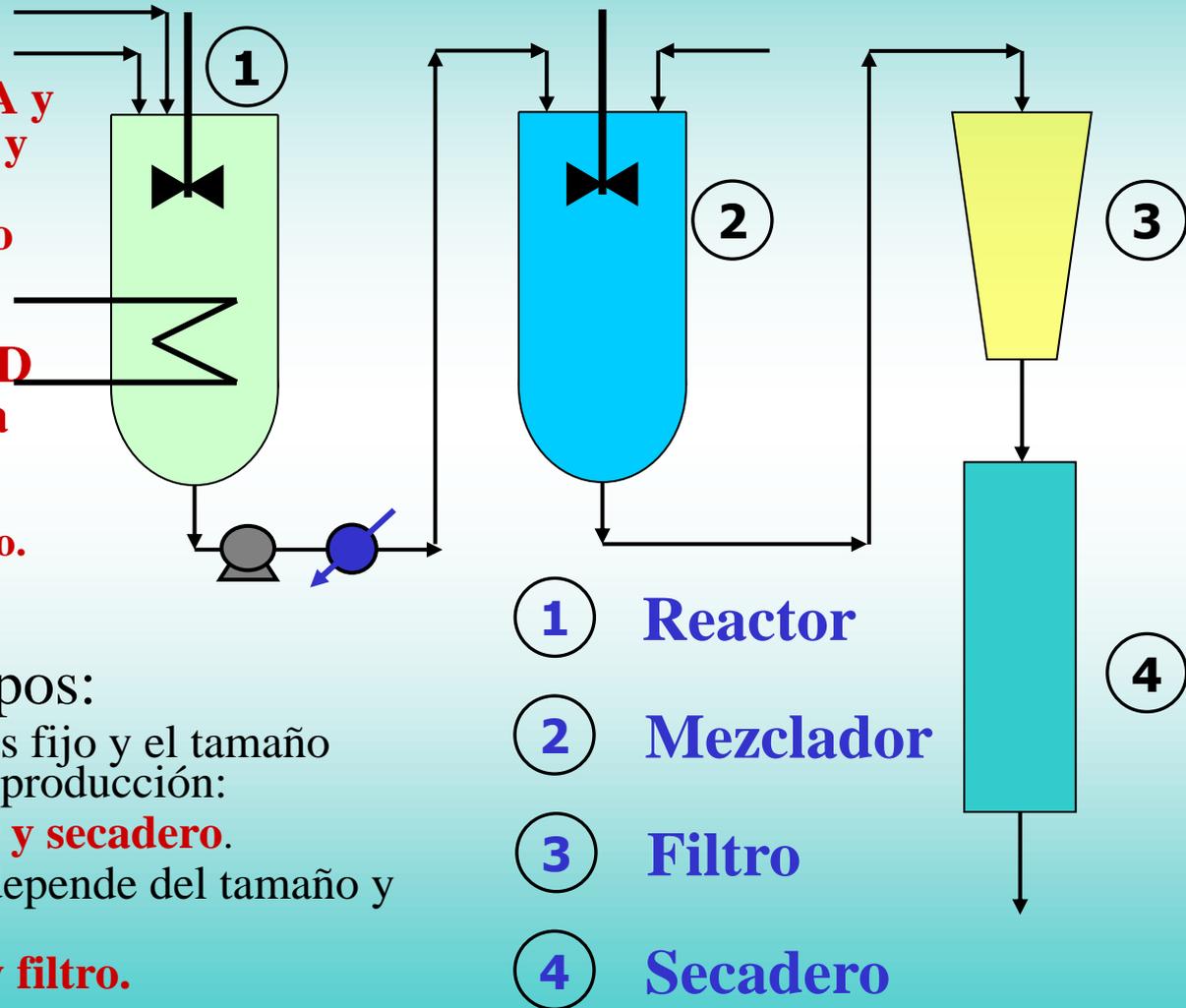
Procesos batch

- En algunos casos, alimentos y productos farmacéuticos, las recetas están fijadas por reglamentaciones.
- En los demás casos las recetas pueden tener grados de libertad, susceptibles de optimización.
- En la primera parte se tratarán casos de receta fija para estudiar los problemas de programación.
- Interesa presentar las nuevas variables, características de estos procesos.
- También las complicaciones que introducen en los cálculos.

Procesos Batch

- La receta se refiere a las distintas etapas

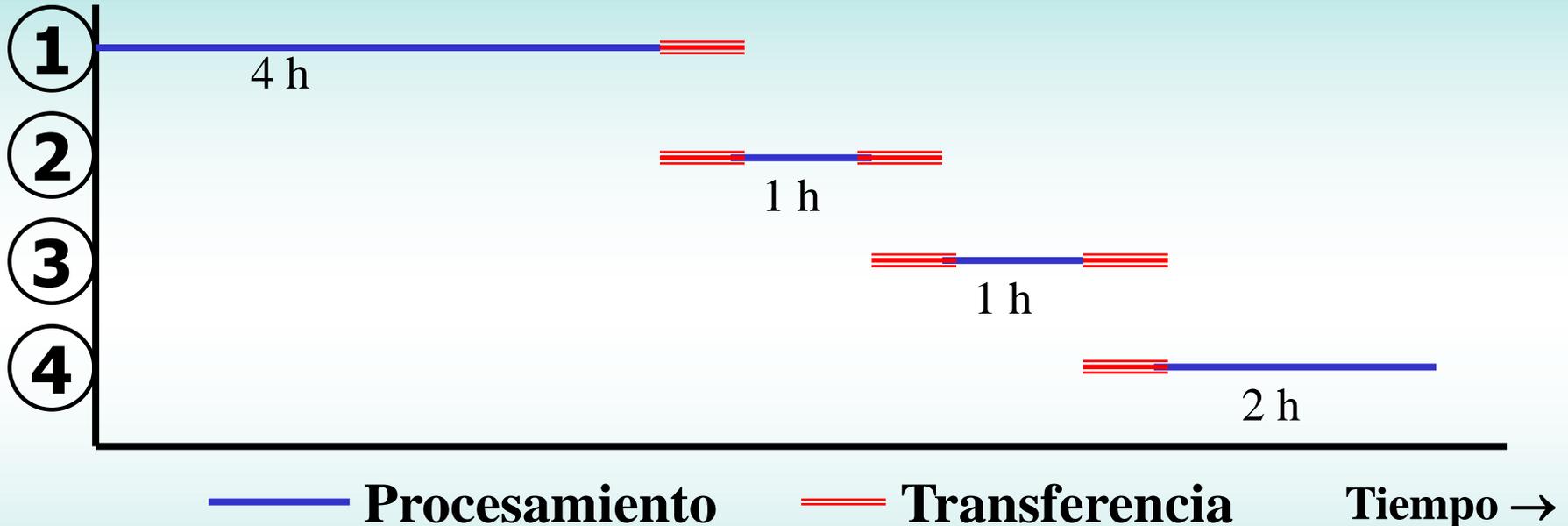
- Mezclar los materiales A y B. Calentar hasta 80 °C y reaccionar durante 4 h. Para formar el producto C.
- Mezclar con solvente D por 1 h a temperatura ambiente.
- Filtrar para separar C sólido.
- Secar por 2 h a 90 °C.



- Hay dos tipos de equipos:
 - El tiempo de operación es fijo y el tamaño depende del volumen de producción:
 - **Reactor, mezclador y secadero.**
 - El tiempo de operación depende del tamaño y volumen de producción:
 - **Bomba, enfriador y filtro.**

Diagramas

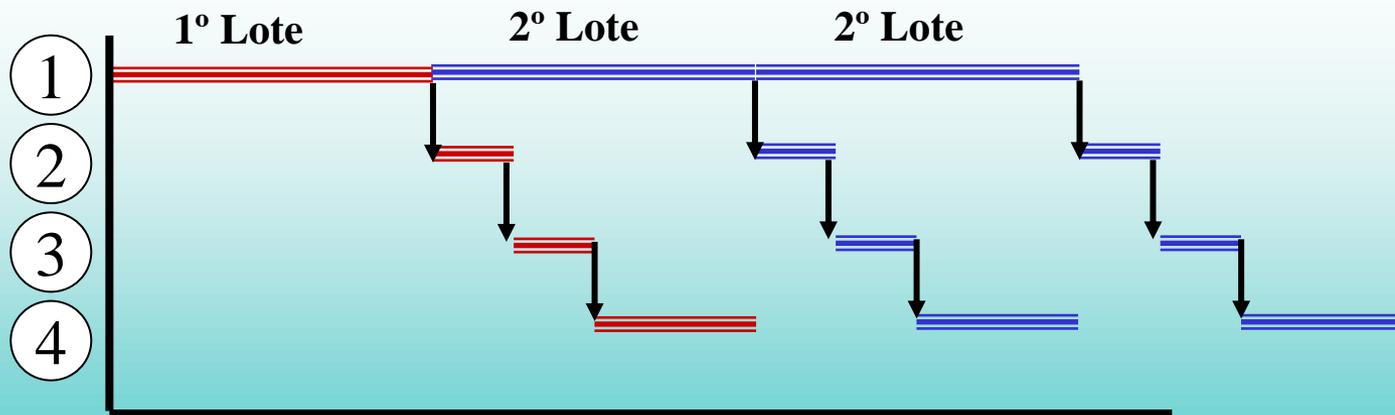
- Esta secuencia se puede representar en un **gráfico de Gantt**.



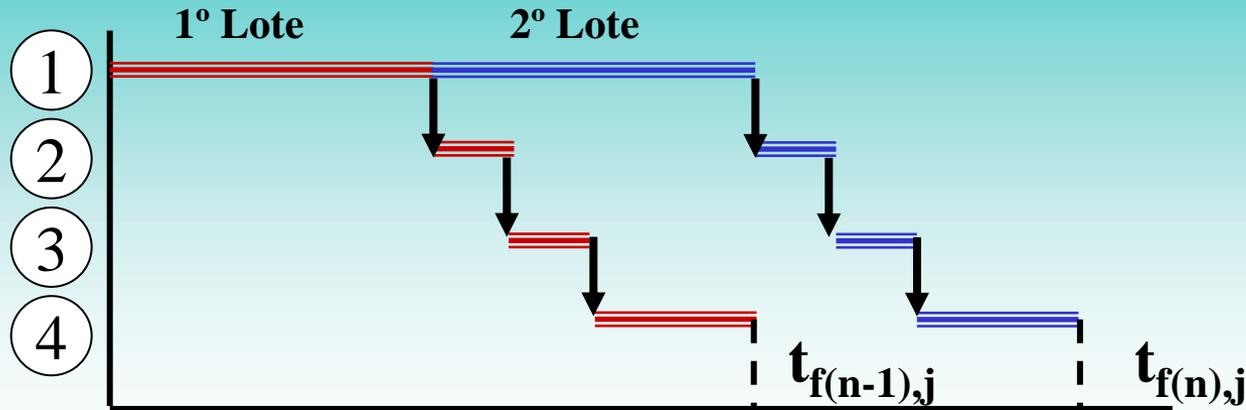
- Los tiempos de transferencia son función de la capacidad de las bombas.
- Cuando son despreciables frente a los de procesamiento se simplifica el diagrama eliminándolos.

Planificación

- Como se deberán producir muchos lotes, la primera decisión es sobre su secuenciamiento:
 - **No sobrepuesto**, solo se procesa un lote simultáneamente.
 - **Sobrepuesto**, se inicia un lote cuando el anterior desocupa el primer equipo.



Planificación



- Se reducen así los tiempos de espera.
 - **En este caso la etapa 1 trabaja sin tiempos de espera.**
 - **También se identifica esta como la *etapa limitante (bottleneck)***
- Se define la ***duración del ciclo***:

$$DC_j = t_{f(n),j} - t_{f(n-1),j}$$

Donde $t_{f(n),j}$ y $t_{f(n-1),j}$ son los tiempos finales de la etapa j para dos ciclos sucesivos.

Planificación

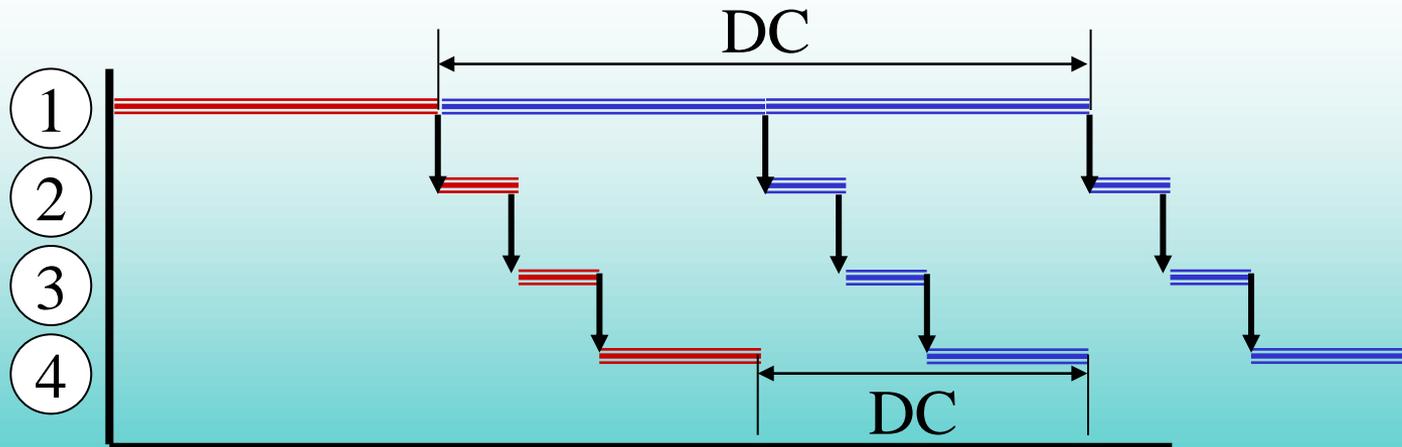
- Si llamamos τ_j al tiempo de procesamiento en la etapa j , la duración del ciclo se calcula:

– No sobrepuesto:

$$DC = \sum_{j=1}^M \tau_j$$

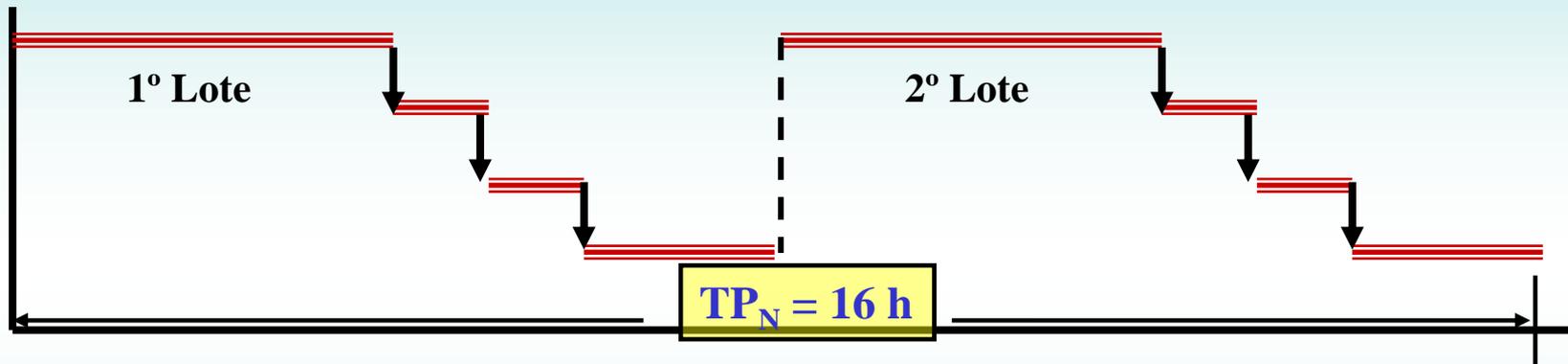
– Sobrepuesto:

$$DC = \max \{ \tau_j \}$$

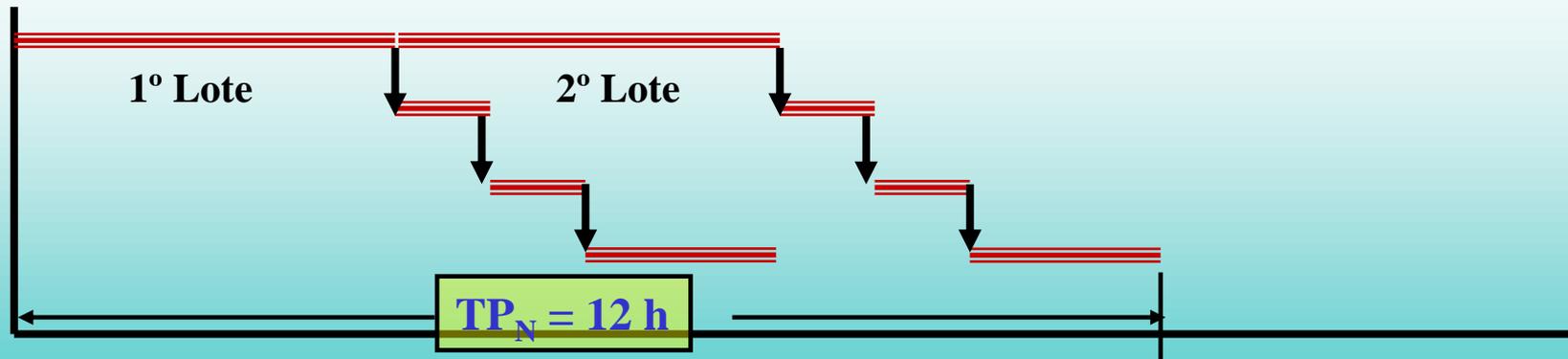


Planificación

- Se define como **tiempo de producción, TP_N** (makespan), al tiempo necesario para producir N lotes.
 - En el caso no sobrepuesto y para dos lotes será:

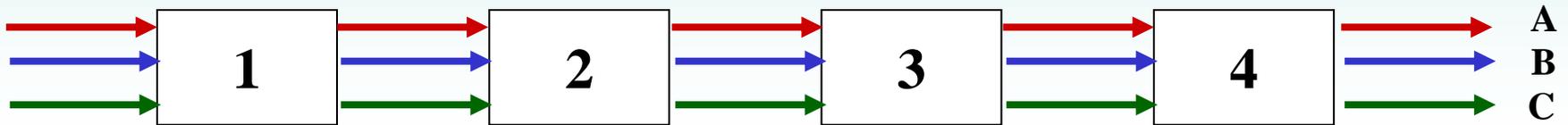


- Para el caso sobrepuesto:

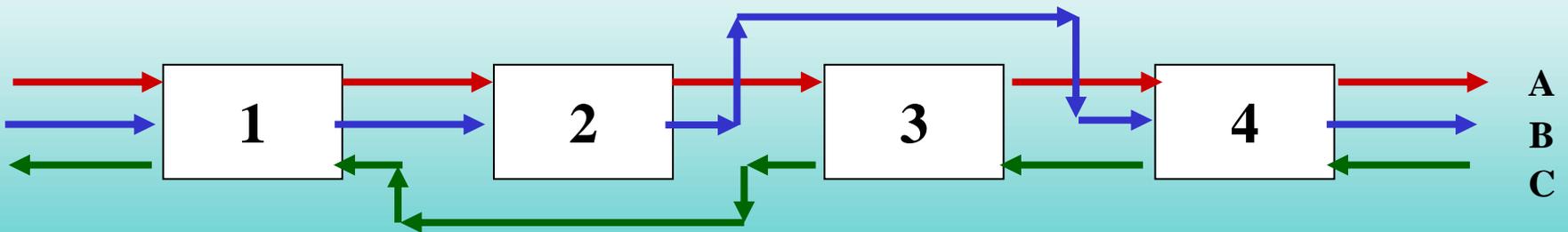


Varios productos

- Se reconocen dos tipos:
 - Plantas **multiproducto**, donde todos los productos requieren la misma secuencia de etapas:



- Plantas **multiplapósito**, donde no todos requieren las mismas etapas y no en la misma secuencia:



VARIOS PRODUCTOS

- Estos tipos se reconocen también por sus nombres en inglés: *flowshop* y *jobshop*, respectivamente.
- Cuando los productos a obtener son muy similares, la planta real se aproximara al tipo multiproducto, cuando son muy diversos a la multipropósito.
- Un caso real, muy frecuente, es cuando se incorpora un nuevo producto a una planta existente.
- En el caso de las plantas con múltiples productos no se puede, por lo general, definir los **tiempos de ciclo**.

VARIOS PRODUCTOS

- Para el análisis de la operación de las plantas de múltiples productos se define el concepto de **campaña de producción**, como la secuencia de operaciones para elaborar un número especificado de lotes de cada producto.
- En este caso se pueden definir dos tipos:
 - **Campanas de producto único**, cuando todos los lotes de un producto se elaboran antes de pasar al siguiente:
 - **AA...ABB...B**
 - **Campanas mixtas**, donde se alterna el uso de equipos, según un plan determinado:
 - **ABAACBBDA...**

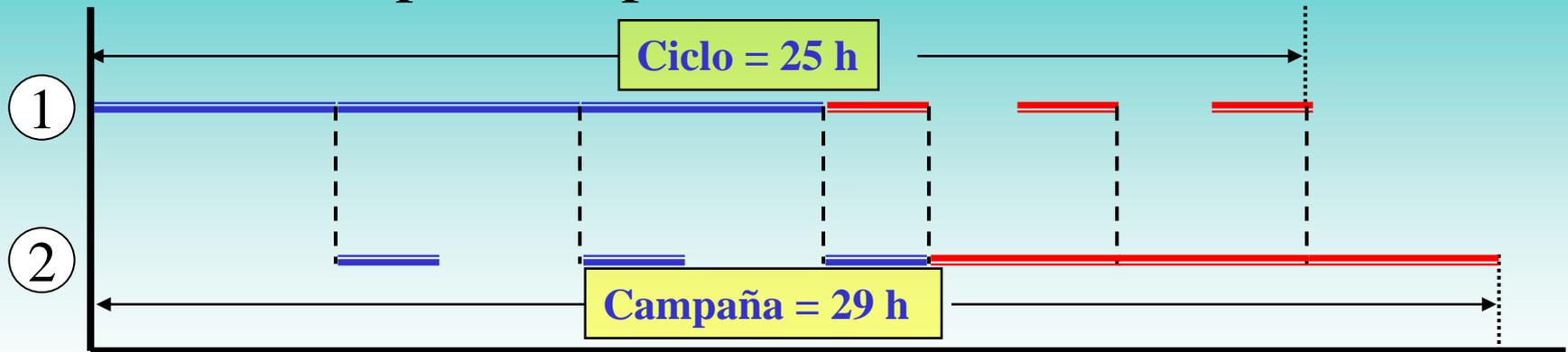
VARIOS PRODUCTOS

- Consideremos un ejemplo de dos productos y dos etapas, en la misma secuencia, en la tabla se indican los tiempos de procesamiento en horas:

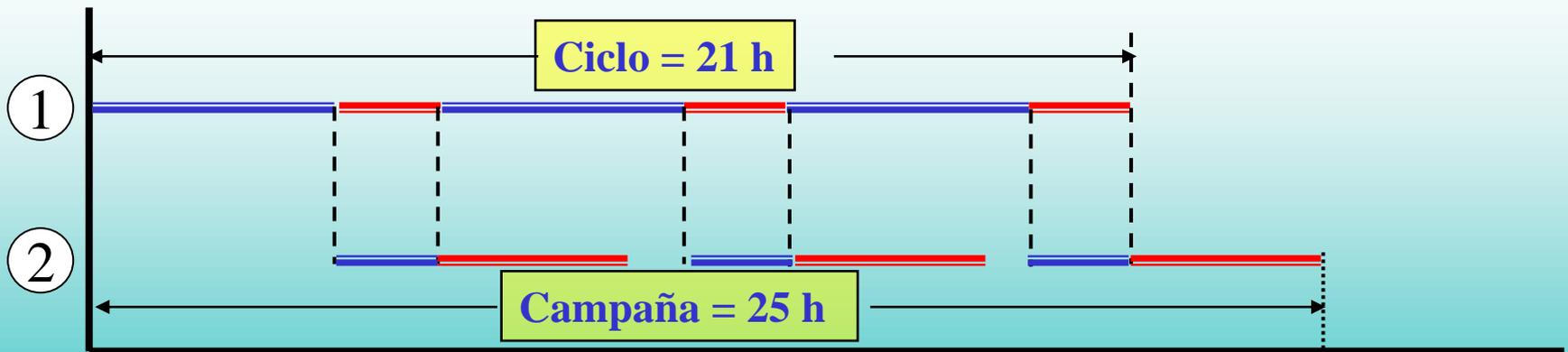
	Etapa 1	Etapa 2
Producto A	5	2
Producto B	2	4

MULTIPRODUCTOS

- Para una campaña de producto único tendremos:

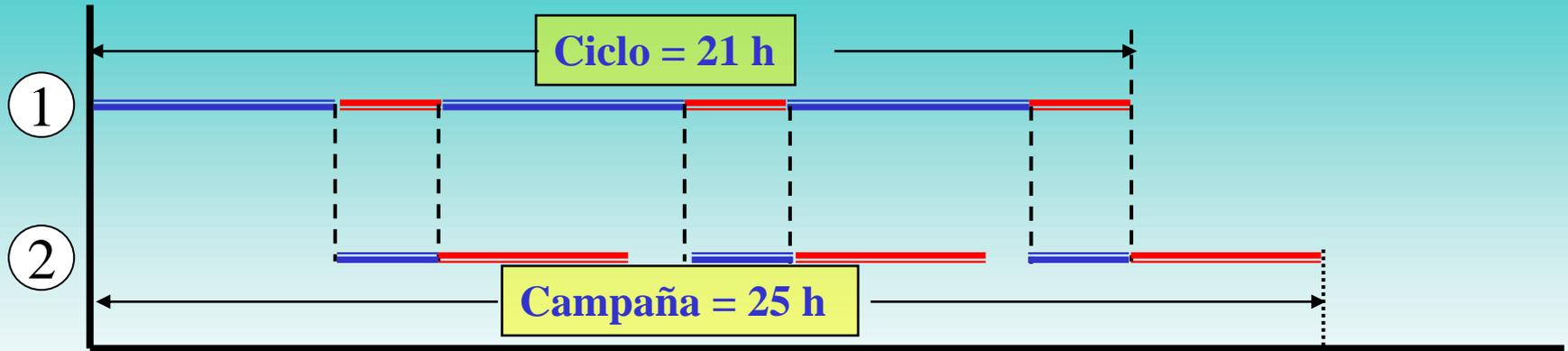


- El ciclo se define como la secuencia AAABBB, para la etapa 1 y el tiempo de producción coincide con la duración de la campaña.
- Para una campaña mixta, ABABAB:

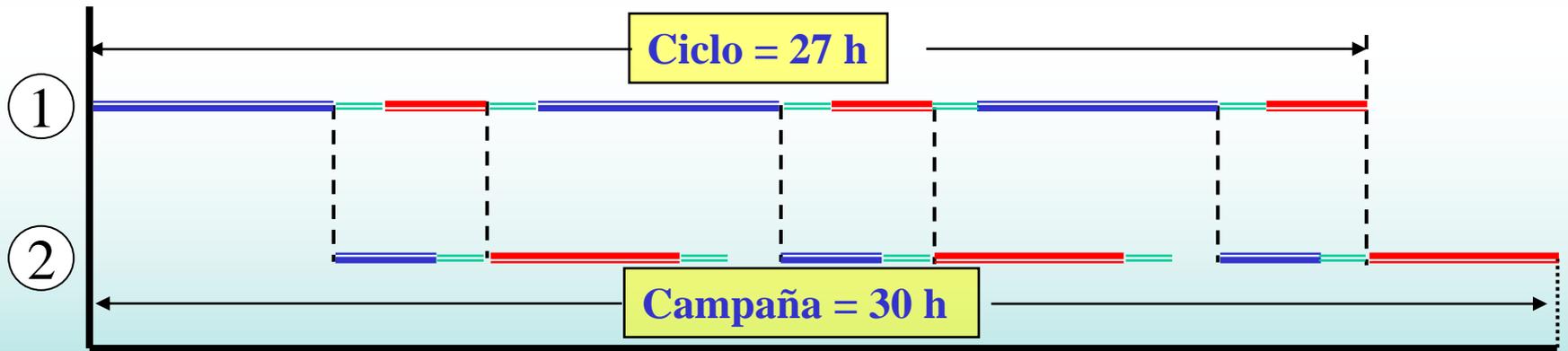


- Puede reducirse la duración del ciclo y la campaña.

MULTIPRODUCTOS



- En algunos casos es necesario limpiar o acondicionar los equipos al cambiar de producto.
- Si el tiempo de reacondicionamiento fuera de 1 h:

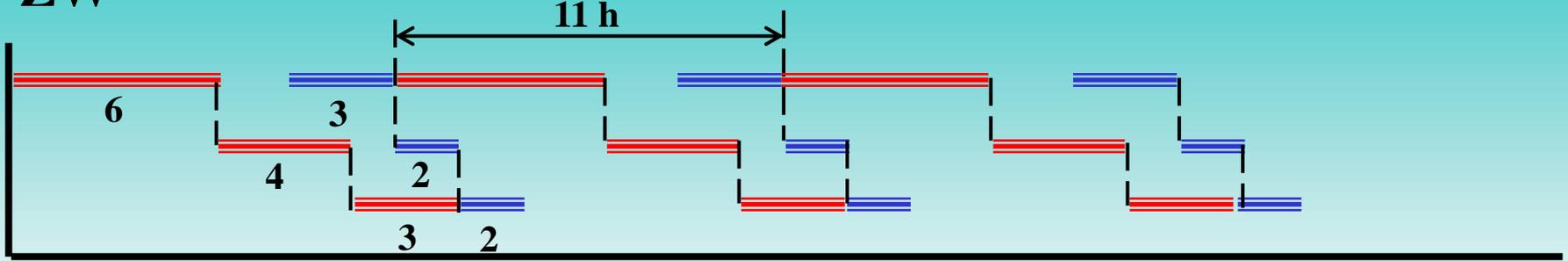


- No hay una regla general sobre la conveniencia de los distintos tipos, *es un problema de optimización.*

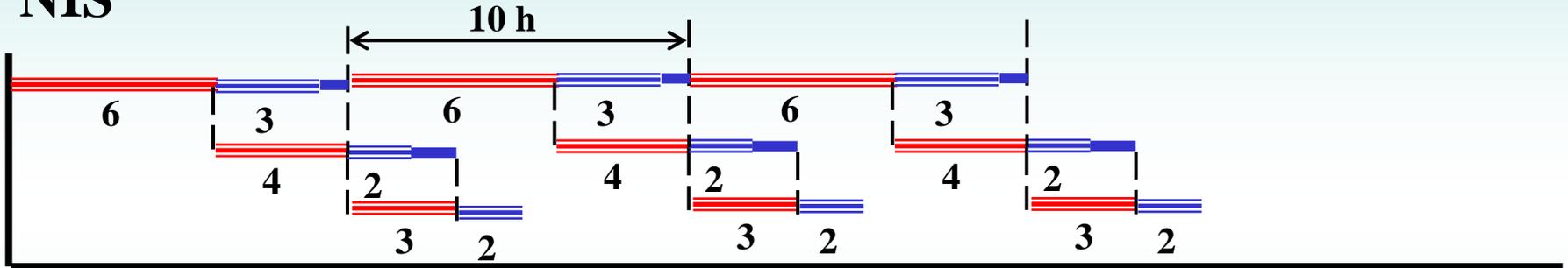
Políticas de transferencia

- Pueden analizarse tres alternativas de transferencia entre etapas:
 - **Espera nula (ZW):**
 - El material se transfiere inmediatamente después de terminado el proceso, el equipo subsiguiente deberá estar desocupado.
 - **Almacenamiento intermedio infinito (UIS):**
 - Cuando se dispone de depósitos de capacidad ilimitada.
 - **Sin almacenamiento intermedio (NIS):**
 - Cuando el lote puede mantenerse en el recipiente de proceso hasta que sea conveniente transferirlo.
- Consideramos un ejemplo con dos productos, **A** y **B** y tres etapas, con una secuencia **ABABAB**

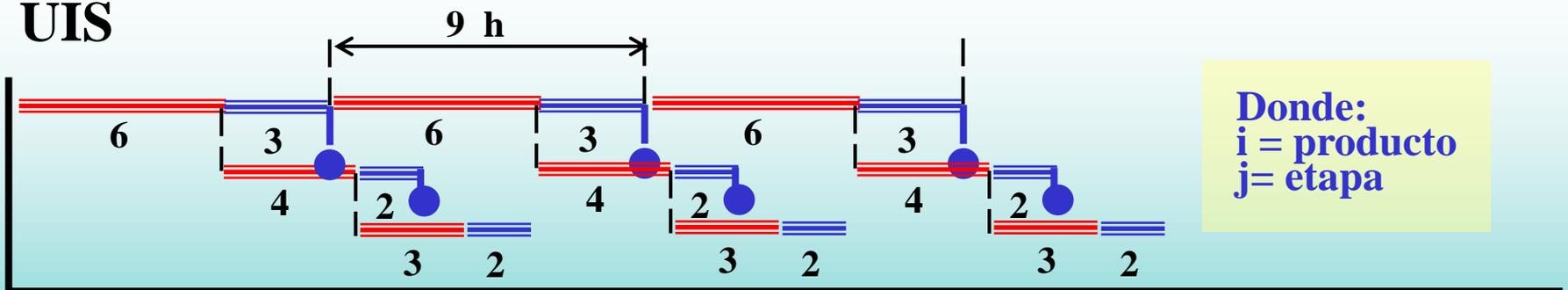
ZW Políticas de transferencia



NIS



UIS



Donde:
i = producto
j = etapa

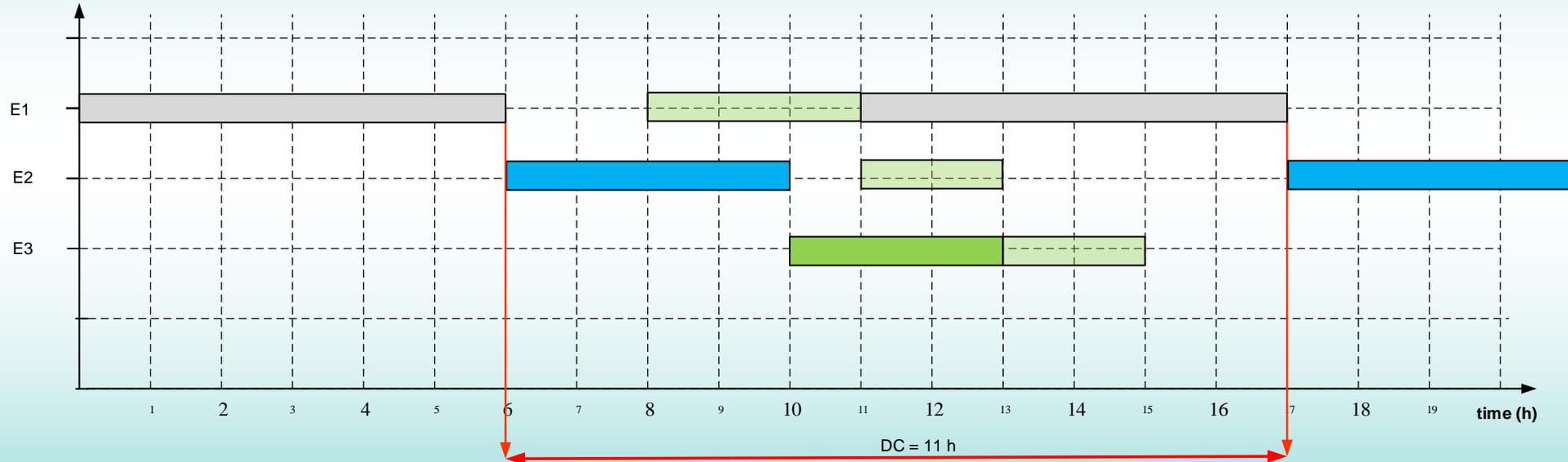
En estos casos puede calcularse la duración del ciclo para el caso UIS como un límite inferior:

$$TC_{UIS} = \max_{j=1 \dots M} \left\{ \sum_{i=1}^N n_i \tau_{i,j} \right\}$$

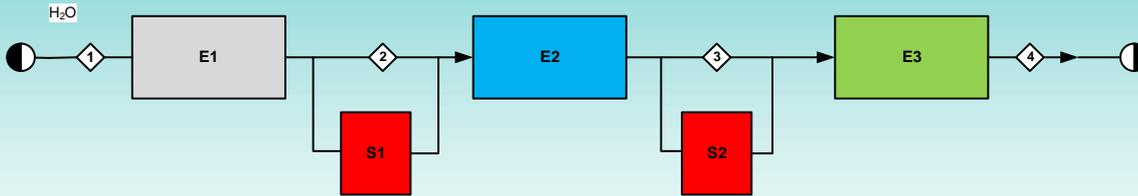
Política de transferencia - ZW



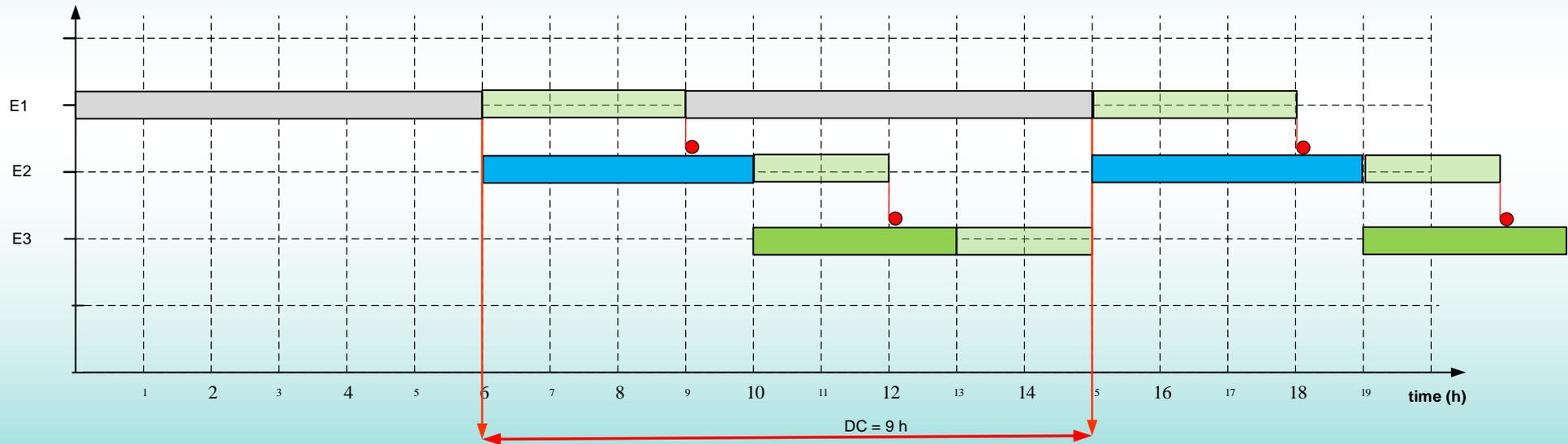
Producto	Etapa 1 (h)	Etapa 2 (h)	Etapa 3 (h)
A	6	4	3
B	3	2	2



Política de transferencia - UIS

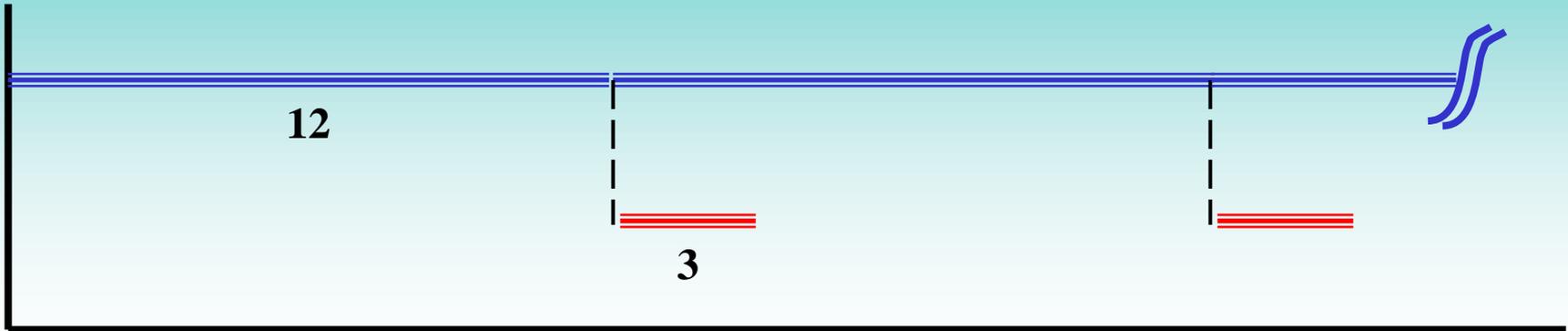


Producto	Etapa 1 (h)	Etapa 2 (h)	Etapa 3 (h)
A	6	4	3
B	3	2	2

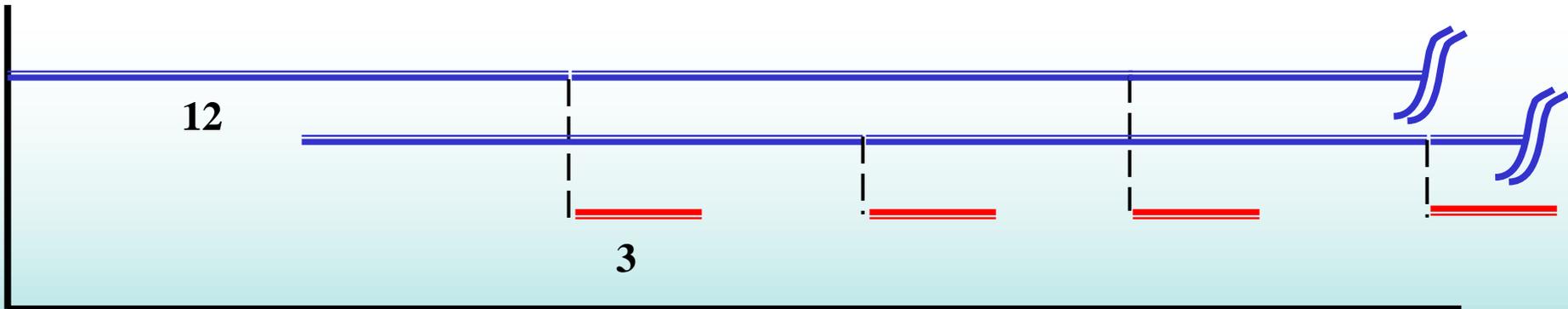


UNIDADES EN PARALELO

- La incorporación de equipos en paralelo es otro grado de libertad a explorar.
- Esto es importante donde existen grandes diferencias en los tiempos de operación.



- Se introduce otra unidad en paralelo y fuera de fase:

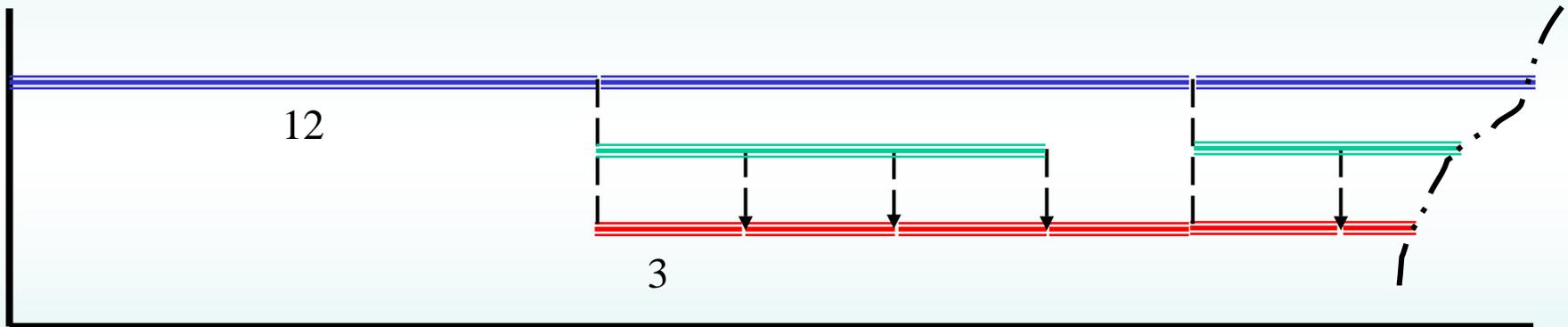


$$DC = \max_{j=1 \dots M} \left\{ \frac{\tau_{ij}}{NP_j} \right\}$$

- Donde NP_j es el número de unidades limitantes en paralelo.

ALMACENAMIENTO

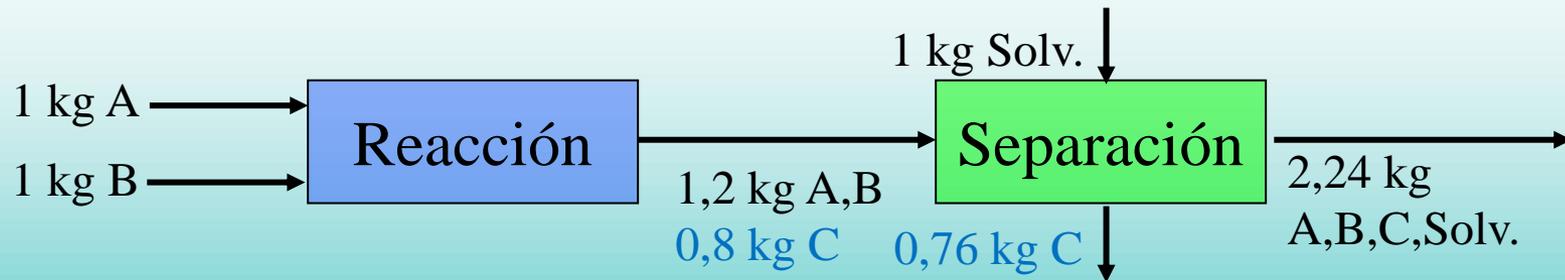
- Otra alternativa en este caso es introducir un **almacenamiento intermedio**, se desacopla así la relación entre tiempos y capacidades:



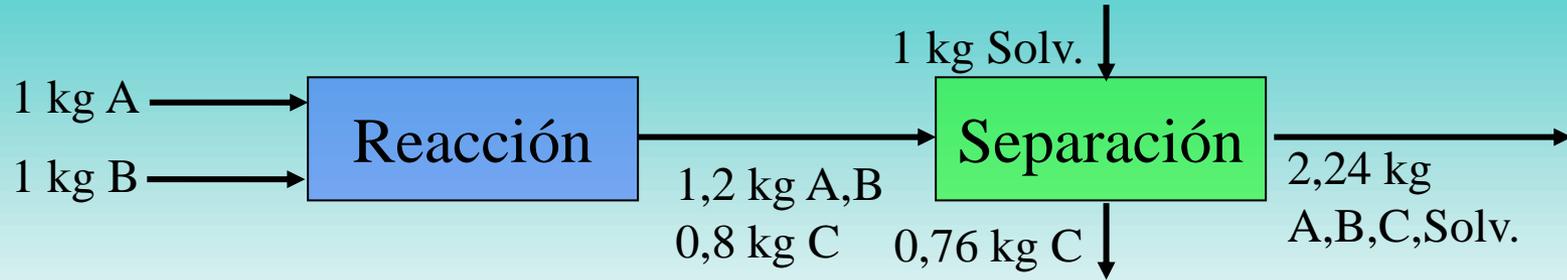
- Si la etapa **1** tiene una capacidad de **1.000**, la **2** tendrá **250** y el almacenamiento **750** y se logra eliminar todos los tiempos de espera.

DIMENSIONAMIENTO

- Consideraremos el caso para una planta de producto único.
- La receta es:
 1. Mezclar 1 kg A, 1 kg B y reaccionar por 4 h, la conversión será 0,4 y la densidad de la mezcla $\rho = 961 \text{ kg/m}^3$.
 2. Agregar 1 kg de solvente y separar por 1 h, se recupera el 95% de C puro, la densidad es $\rho = 1.041 \text{ kg/m}^3$.
- El esquema de proceso y balance de materiales es:



DIMENSIONAMIENTO



- Conviene definir el **factor de tamaño, FT_j** , para cada etapa **j**:
 - **Volumen del recipiente necesario para obtener 1 kg del producto final.**
- En nuestro caso:

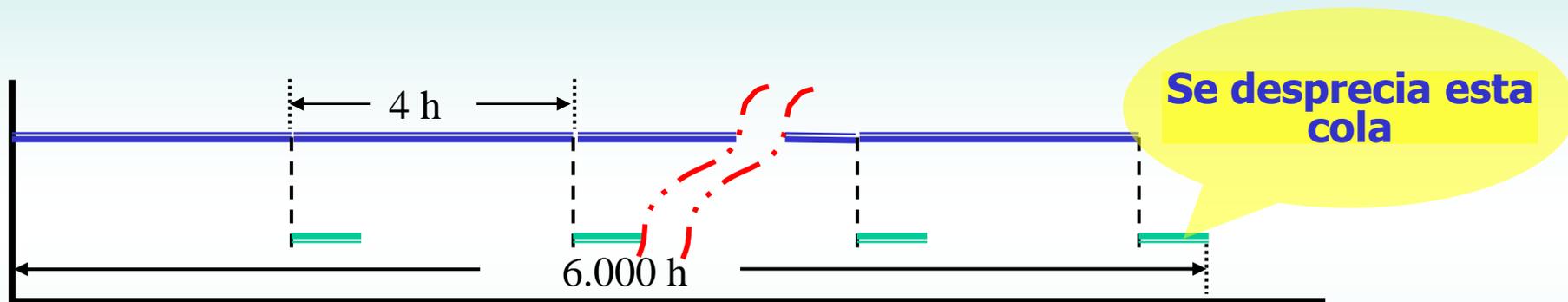
$$FT_1 = \frac{1}{961} \left| \frac{m^3}{kg} \right| \times \frac{2 \text{ kg mezcla}}{0,76 \text{ kg prod.}} = 0,0027 \frac{m^3}{kgC}$$

$$FT_2 = \frac{1}{1.041} \left| \frac{m^3}{kg} \right| \times \frac{3 \text{ kg mezcla}}{0,76 \text{ kg prod.}} = 0,0038 \frac{m^3}{kgC}$$

DIMENSIONAMIENTO

- Si utilizamos un equipo por etapa y operamos sin tiempo de espera (**ZW**), la duración del ciclo es:

$$DC = \max \{4,1\} = 4 \text{ h}$$



- Si la producción deseada son 500.000 kg/año y el tiempo de operación 6.000 h/año, el número de lotes por año (NL) y su tamaño de lote (**Q**) serán:

$$NL = 6.000/4 = 1.500 ; Q = 500.000/1.500 = 333\text{kg}$$

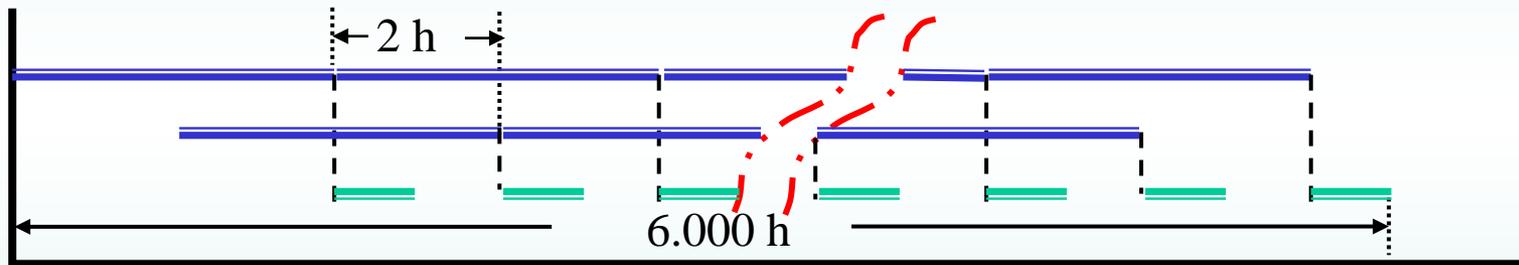
- El volumen de los equipos: $V_j = FT_j Q$

$$V_1 = 0,0027 \times 333 = 0,9 \text{ m}^3 ; V_2 = 0,0038 \times 333 = 1,3 \text{ m}^3$$

DIMENSIONAMIENTO

- Como el factor limitante es la primer etapa se puede proponer utilizar dos equipos fuera de fase, la duración del ciclo será:

$$DC = \max \{4/2, 1\} = 2 \text{ h}$$



- Esto implica que se puede procesar el doble de lotes y su capacidad será la mitad, el volumen de los equipos es:

$$V_1 = 0,0027 \times 166,5 = 0,45 \text{ m}^3 ; V_2 = 0,0038 \times 166,5 = 0,65 \text{ m}^3$$

DIMENSIONAMIENTO

- Consideremos el caso de **varios productos**:

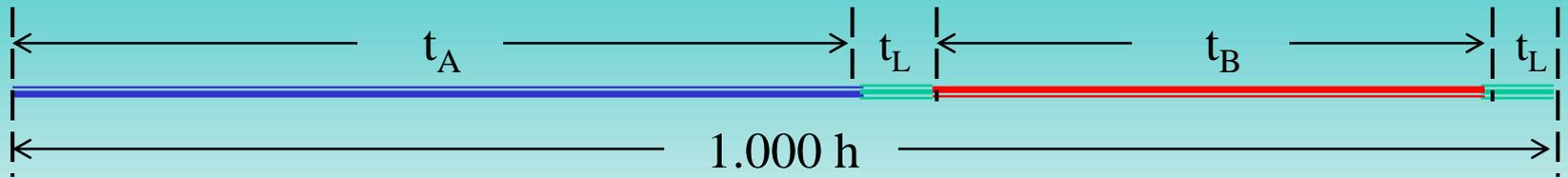
Prod.	Tiempo de procesamiento		Factor de tamaño, m ³ /t	
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2
A	8	3	0,0050	0,0031
B	6	3	0,0056	0,0025

- Deseamos obtener **500 t** de **A** y **300 t** de **B** por año, con **6.000 h** de operación. El tiempo de limpieza de equipos al cambiar de producto es de **4 h**.

DIMENSIONAMIENTO

- Para proceder con el dimensionamiento se deben fijar **varios grados de libertad**, que en la practica son objeto de optimización:
 - **Programa de producción: adoptaremos el más simple, campañas de un producto.**
 - **Longitud de la campaña de producción (T_0), dependerá de características comerciales, adoptamos 1.000 h.**
 - **Para distribuir los tiempos de producción entre A y B, adoptamos el mismo tamaño de lote para los dos procesos ($Q_A = Q_B$).**

DIMENSIONAMIENTO



- El tiempo efectivo de producción es **992 h para $t_L=4$ h**

$$t_A + t_B + 2t_L = T_O$$

$$Q_A = \frac{P_A}{L_A}$$

$$L_A = \frac{t_A}{DC_A}$$

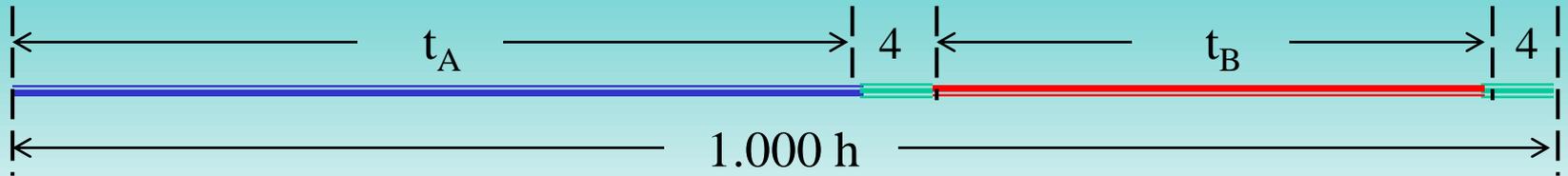
$$Q_B = \frac{P_B}{L_B}$$

$$L_B = \frac{t_B}{DC_B}$$

Son seis (6) variables y la cantidad de ecuaciones es cinco (5). Hay un grado de libertad. Para su resolución es necesario una ecuación adicional o resolver por optimización. Para resolver se asume que los tamaños de lotes son iguales.

$$Q_A = Q_B$$

DIMENSIONAMIENTO



- El tiempo efectivo de producción es **992 h**.
- El tamaño de lote (**Q**) será:

$$Q_A = Q_B = \text{Prod}_j / N^\circ \text{Lotes}_j = \text{Prod}_j / (t_j / DC_j)$$

Se plantea así un sistema de dos ecuaciones:

$$\frac{83,33}{t_A / 8} = \frac{50}{t_B / 6}$$
$$t_A + t_B = 992$$

La solución es:

$$t_A = 684 \text{ h y } t_B = 308 \text{ h}$$

$$Q_A = Q_B = 0,974 \text{ t}$$

DIMENSIONAMIENTO

- Conociendo la producción de cada lote se puede calcular la capacidad de los equipos:

$$V_{i,j} = FT_{i,j} Q_j$$

	Etapa 1	Etapa 2
A	4.87	3,02
B	5,45	2,44

- Se adopta en cada caso el mayor. Si la diferencia es muy grande se deberá adoptar otra regla.

Inventarios (existencias)

- Un tema importante en el diseño de las plantas discontinuas es el la elección de la **duración de la campaña de producción**.
- Esto implica un conflicto entre la fracción de tiempo necesaria para la transición y limpieza y los inventarios de productos.
 - **Campaña corta:** menor inventario de productos y mayor pérdida de tiempo en transiciones.
 - **Campaña larga:** se reduce la pérdida de tiempo y aumentan los inventarios.

Inventarios

- Para los datos del ejemplo anterior se puede calcular esta variación de inventarios:

– **Velocidad de producción:**

$$p_j = \text{Prod}_j/t_j$$

$$p_A = 83.333/684 = 121,8 \text{ kg/h}$$

$$p_B = 50.000/308 = 162,3 \text{ kg/h}$$

– **Velocidad de consumo:**

$$c_j = \text{Prod}_j/D_{\text{camp.}}$$

$$c_A = 83.333/1.000 = 83,3 \text{ kg/h}$$

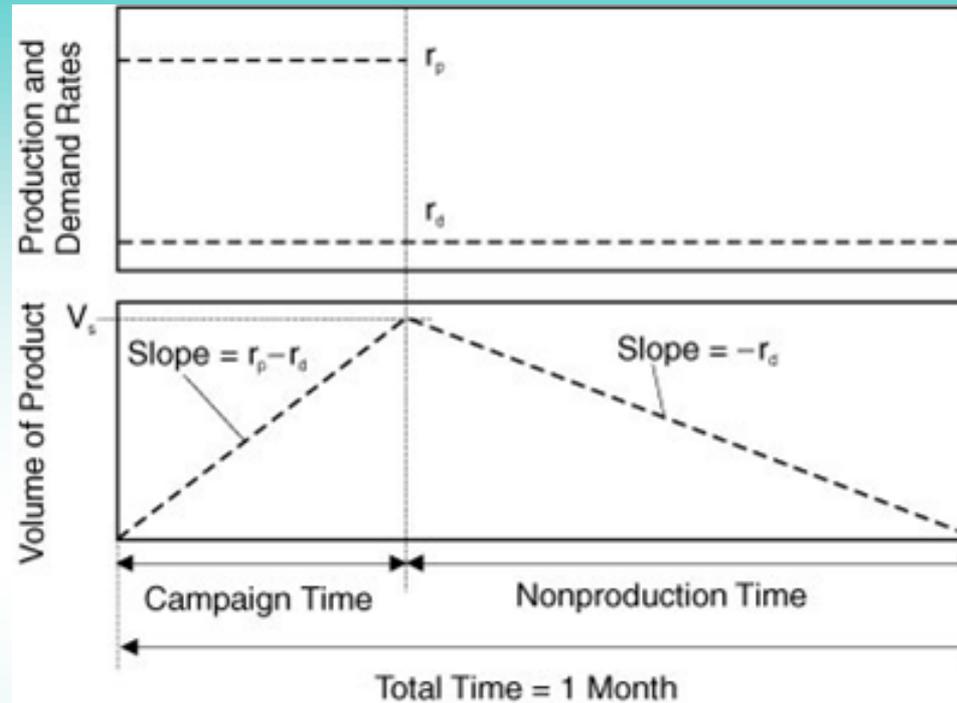
$$c_B = 50.000/1.000 = 50,0 \text{ kg/h}$$

– **Velocidad de acumulación:** $ac_j = p_j - c_j$

$$ac_A = 121,8 \text{ kg/h} - 83,3 \text{ kg/h} = 38,5 \text{ kg/h}$$

$$ac_B = 162,3 \text{ kg/h} - 50,0 \text{ kg/h} = 112,3 \text{ kg/h}$$

Procesos Batch. Inventarios



Acumulación producto

Campaign time

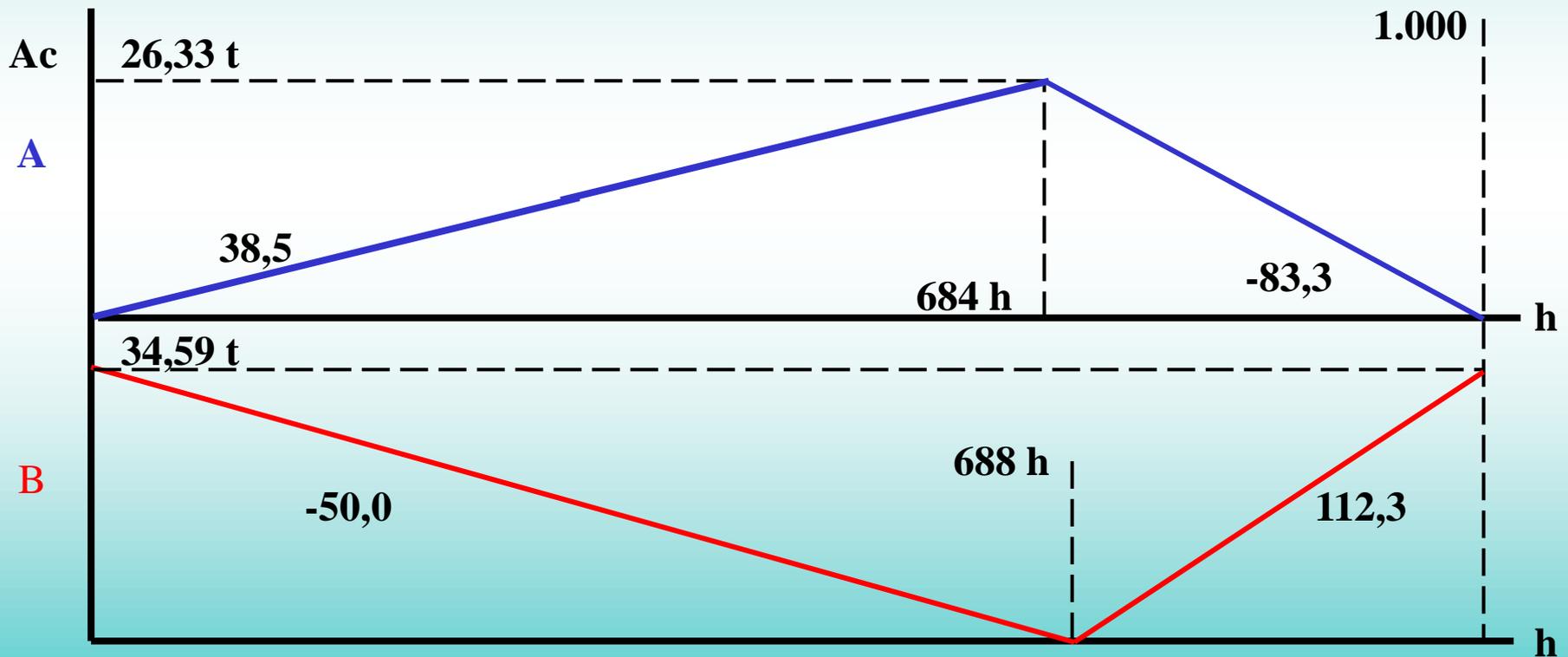
$$V_s = [r_p - r_d] t_{ramp}$$

Velocidad de producción

Velocidad de demanda

Inventarios

- Esta información se puede presentar gráficamente, considerando que comienza la campaña sin inventarios de **A** y el máximo de **B**:



Inventarios

- Se puede calcular el costo de mantener estos inventarios determinando el stock promedio de cada producto y conociendo el costo unitario de almacenamiento:

– **El stock promedio se determina dividiendo por la duración de la campaña el área de la curva de evolución de inventarios o existencias:**

$$I_A = 1.000 \times 26,33 / 2 \times 1.000 = 13,16 \text{ t}$$

$$I_B = 1.000 \times 34,59 / 2 \times 1.000 = 17,30 \text{ t}$$

– **Si el costo unitario de mantenimiento de existencias es de 1.250 \$/t año, el costo total será:**

$$CI = 1.250 \times (13,16 + 17,30) = 38.075 \text{ \$/año}$$

SINTESIS

- La síntesis de plantas discontinuas es un problema complejo por:
 - Existen muchos conflictos de decisión y sus interacciones son significativas.
 - El número de alternativas es muy alto.
- En general se buscará maximizar el VAN:

$$\begin{aligned} \text{VAN}_{(i)} = & -I + (R - CO - CI)(1 - tx) [1 - (1 + i)^H/i] \\ & + (I/n)tx [1 - (1 + i)^H/i] \\ & + sI/(1 + i)^H \end{aligned}$$

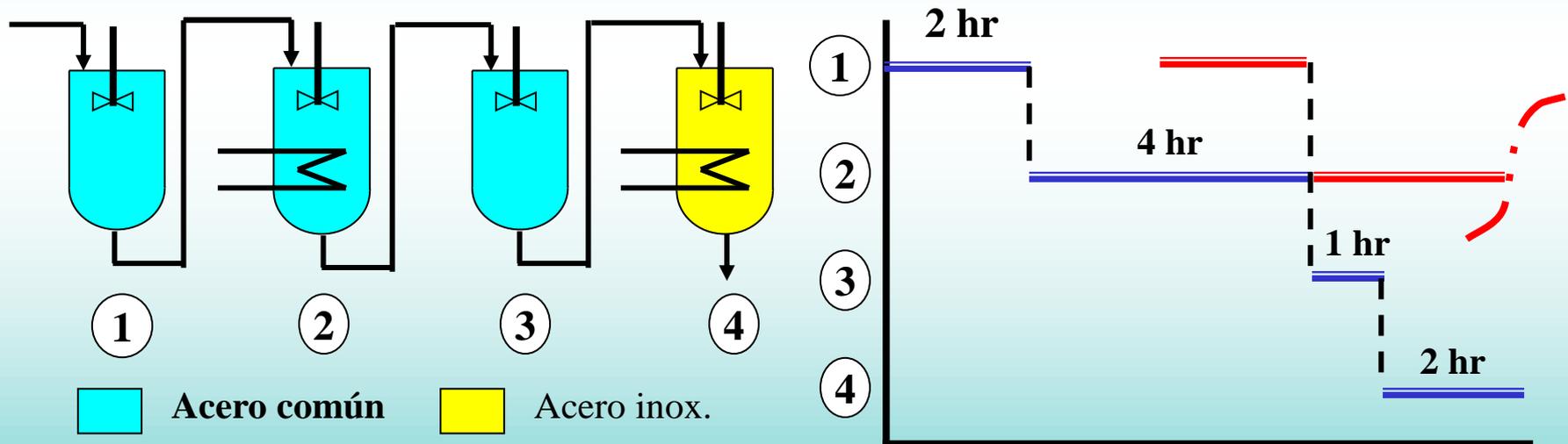
- Donde:
 - I = Inversión.
 - R = Ingreso por ventas.
 - CO = Costo de operación.
 - CI = Costo de mantenimiento de **inventarios o existencias**.
 - tx = Tasa del impuesto a las ganancias
 - n = Vida útil impositiva
 - i = Tasa de actualización
 - H = Horizonte de tiempo de evaluación.

SINTESIS

- Se plantean así tres niveles de decisión y sus cuestiones principales son:
 - **Nivel estructural:**
 - **Asignación de tareas a equipos.**
 - **Número de unidades en paralelo.**
 - **Almacenamiento intermedio.**
 - **Nivel de dimensionamiento:**
 - **Dimensionamiento de los equipos.**
 - **Nivel de programación:**
 - **Naturaleza de la campaña de producción.**
 - **Política de transferencias.**
 - **Duración de la campaña.**
 - **Secuenciamiento de los productos.**

SINTESIS

- Veremos un ejemplo del tratamiento a nivel estructural, donde la asignación de tareas a equipos tiene influencia significativa en la programación y la economía del proceso.
- En un caso de cuatro etapas, la primera alternativa es asignar un equipo a cada etapa:

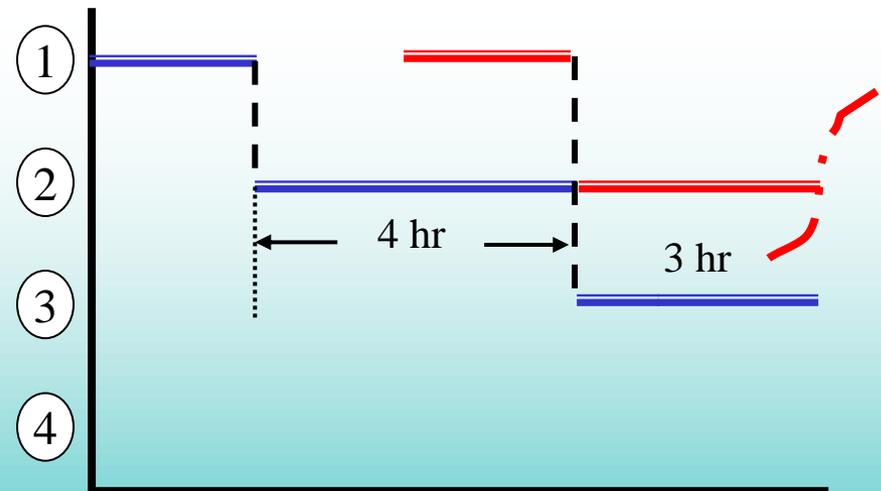
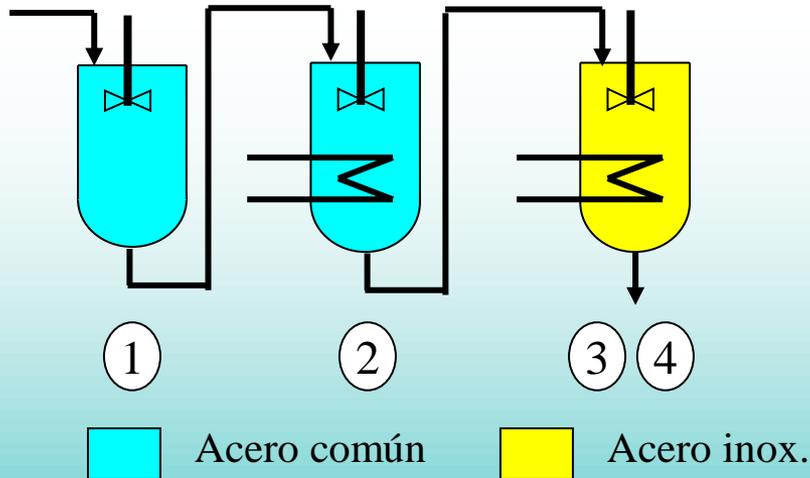


SINTESIS

- Una alternativa es unificar operaciones en un equipo siempre que la suma de los tiempos sea inferior a la duración del ciclo, en nuestro caso:

$$E3 + E4 = 1 + 2 < 4$$

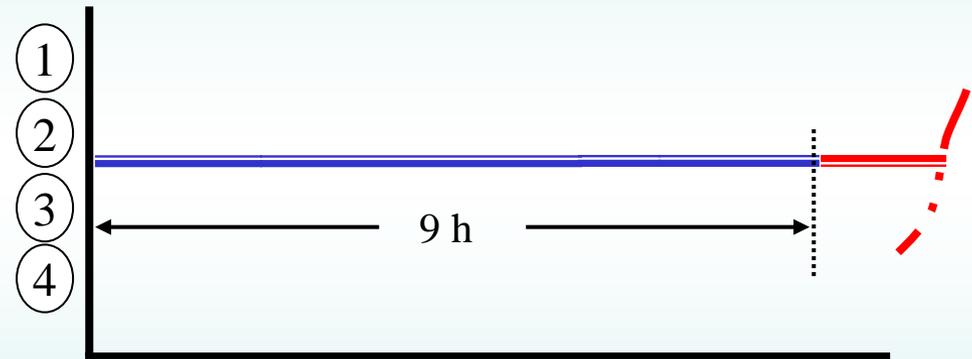
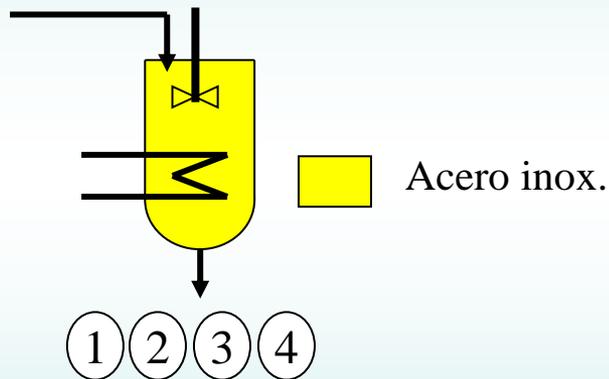
- Es decir utilizamos el reactor de inoxidable para el mezclado. El tamaño de los equipos no cambia.



SINTESIS

- Continuando con esta idea podemos proponer unificar todos los equipos, así:

$$E1 + E2 + E3 + E4 = 2 + 4 + 1 + 2 > 4$$



- En este caso tendremos un solo equipo, de acero inoxidable y su tamaño sería más del doble.

Este es el tipo de conflicto que debe resolverse por optimización.

SINTESIS

- Otra decisión estructural importante es determinar el número de etapas en paralelo o la asignación de almacenamiento intermedio, se reduce así la duración del ciclo pero hay algunos problemas:
 - **La factibilidad de almacenamiento intermedio esta determinada por la naturaleza del material, posibilidad de reacciones secundarias, etc.**
 - **La alternativa de equipos en paralelo se prefiere cuando es necesario mantener la integridad de un lote.**

SINTESIS

- Para facilitar la resolución del problema de dimensionamiento de los equipos se pueden adoptar decisiones respecto a las relaciones de tamaño:
 - **Mismo tamaño de lote, cuando los factores de tamaño son muy distintos la solución no es conveniente.**
 - **Otras reglas conducen a sistemas de ecuaciones de difícil resolución.**

Por su complejidad este tipo de problemas conduce a la aplicación de técnicas avanzadas de programación matemática.

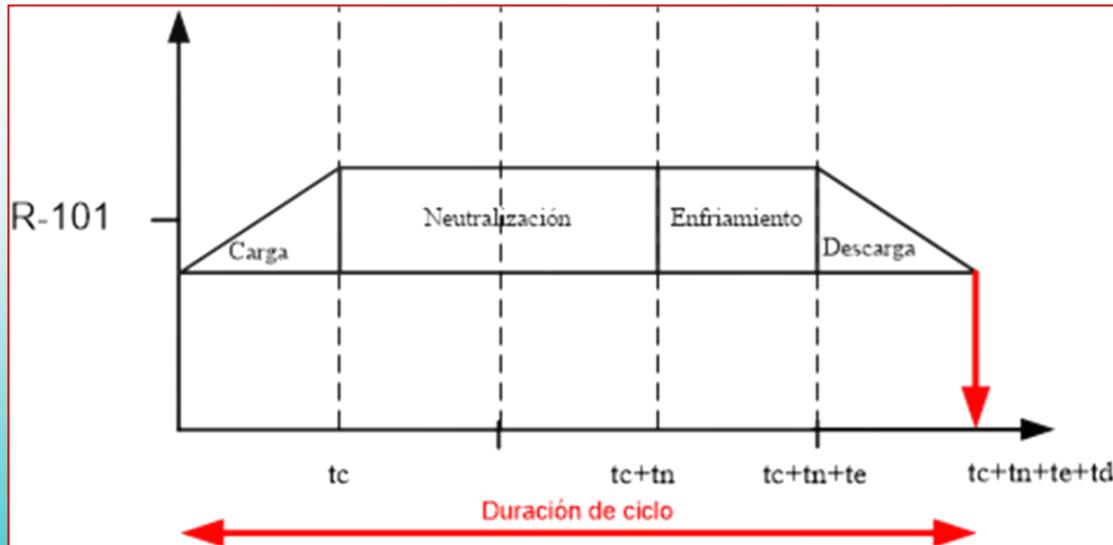
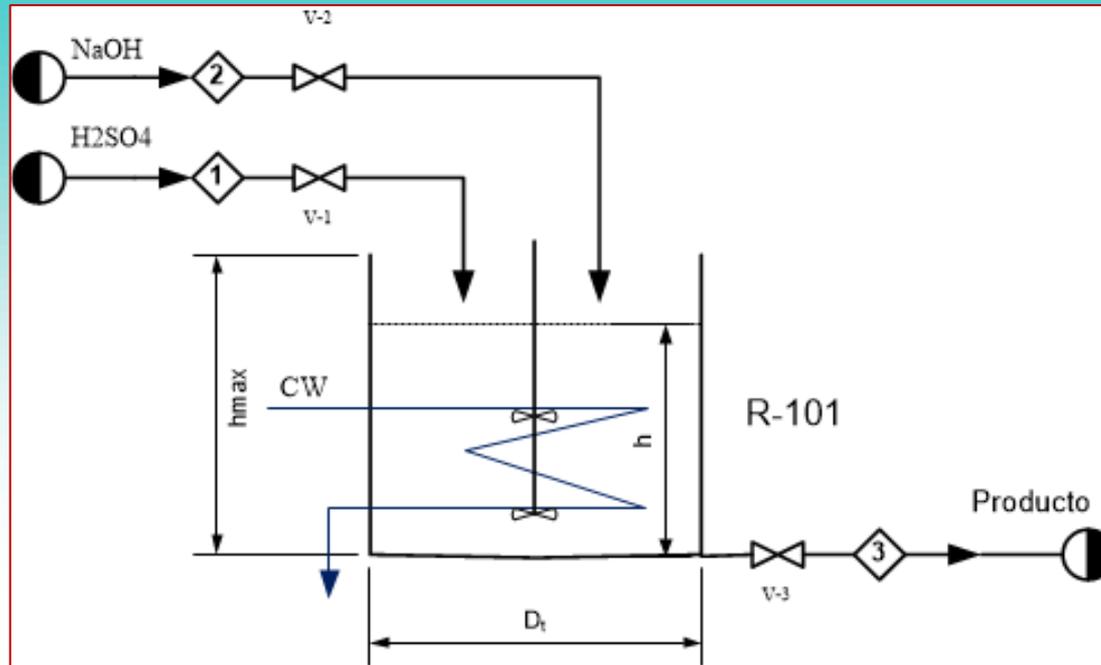
Neutralización, enfriamiento y descarga

Se deben neutralizar 100 kg de una solución de H_2SO_4 al 25 % en peso. La solución acuosa se halla en un tanque a 30 °C de temperatura y se dispone para la neutralización de una corriente de NaOH al 10 % en peso a una temperatura de 20 °C (293 K) y con un caudal de 10 kg/min. Mientras ocurre la reacción no hay ninguna corriente de salida del tanque. El tanque, que estará bien agitado, dispone también de un serpentín-refrigerante para la eliminación de parte del calor generado por la reacción química. El fluido que circulará por el serpentín se halla a 15 °C (288 K), siendo el área de refrigeración del serpentín de 0,2 m², con un coeficiente global de transferencia de calor de 300 kcal/(h m² °C). Suponiendo que la capacidad calorífica de todas las soluciones es constante e igual a la del agua. El calor de reacción y disolución es $-1,38 \times 10^5$ J/mol.

Determinar:

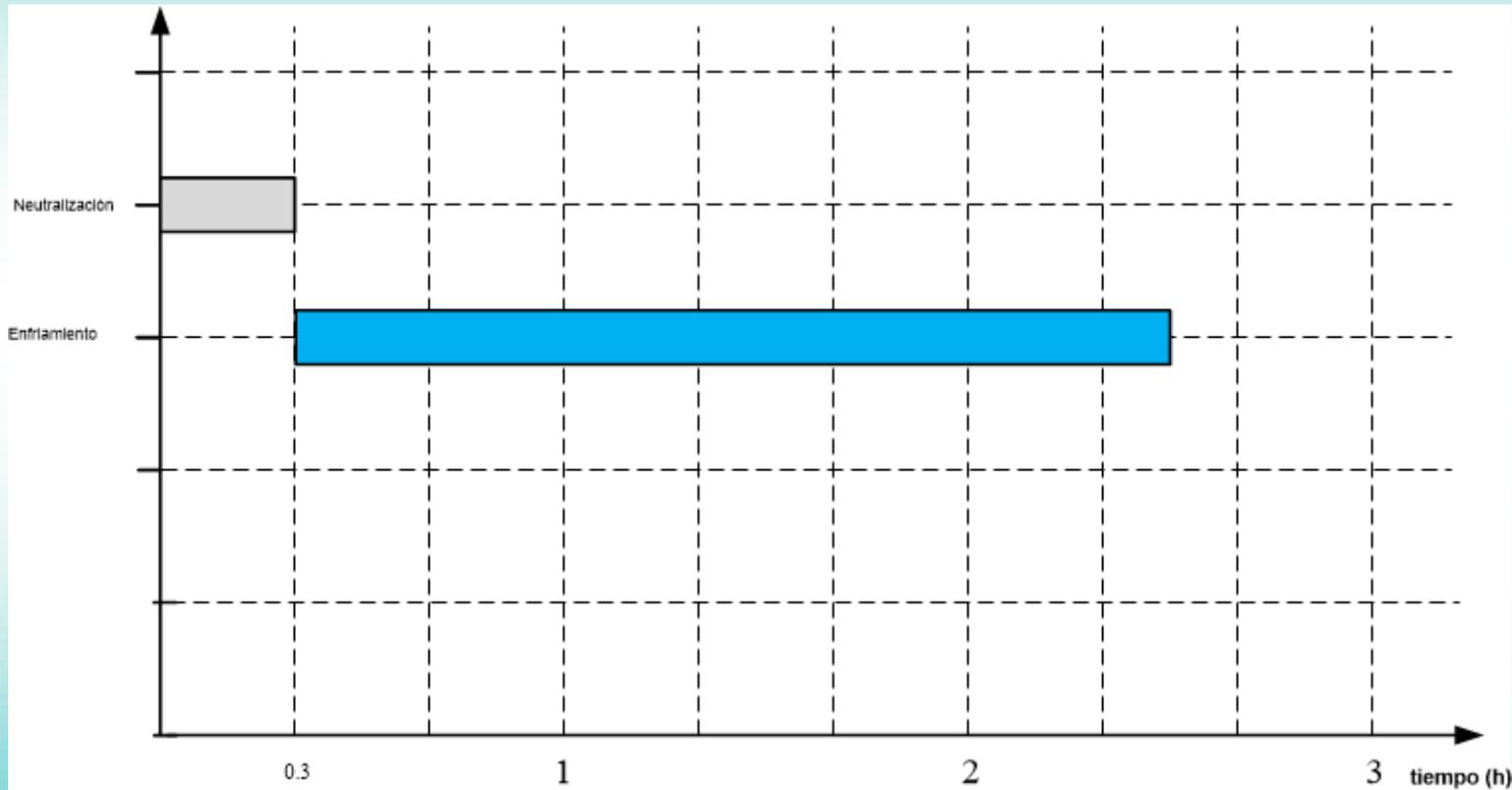
- La variación de la composición y de la temperatura en el tanque con el tiempo.
- El tiempo que dura la reacción química.
- El tiempo que tarda en enfriarse hasta una temperatura de 30 °C.
- El tiempo que tarda en descargarse si el diámetro es de 2", con relación $H/D=2.5$.

Proceso batch



Proceso batch

- Los tiempos de procesamiento estimados son:
 - Neutralización: 0,2 h
 - Enfriamiento: 2,2 h



- Resolución en Caso de estudio. Neutralización de una solución de H_2SO_4