

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
INDUSTRIALS DE BARCELONA (UPC)**
Departament d'Enginyeria Química

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE
PLANTAS QUIMICAS
MULTIPRODUCTO DE PROCESO
DISCONTINUO**

Autor: Antonio España Camarasa

Barcelona, septiembre de 1994

2. Introducción al proceso discontinuo

2.1. Justificación e importancia de los procesos discontinuos

Desde el inicio de la industria química contemporánea, los procesos caracterizados por etapas discontinuas se han estado utilizando mayoritariamente en la elaboración de un gran número de productos. Sin embargo, razones económicas han motivado que hasta hace relativamente poco tiempo se hayan dedicado muchos más esfuerzos a analizar y mejorar los sistemas de producción en continuo: los productos de mayor demanda en el mercado justifican inversiones enormes en una sola planta dedicada a la fabricación de un único producto; esta planta resulta mucho más productiva si trabaja de forma continua, pero para ser más competitiva que el resto (algunas veces incluso a nivel de mercado mundial) debe alcanzar unos niveles de eficacia muy elevados.

Con los márgenes de beneficios cada vez más ajustados, debido a la creciente presión de la competencia, la rentabilidad de los productos que se han dado en llamar de "química fina" (industria farmacéutica, pigmentos, colorantes, cosmética, etc.) ha provocado un interés creciente en los procesos discontinuos: por un lado, los volúmenes de producción que se manejan en este sector son comparativamente reducidos, por lo que en muchos casos no se justifica la construcción de una gran planta dedicada a la producción de un único producto; por otra parte, existe siempre un interés por rentabilizar al máximo las inversiones y aprovechar economías de escala. La solución obvia para conjugar ambos factores consiste en una planta cuya finalidad no sea la de elaborar un producto de forma continua y siguiendo una determinada receta, sino al contrario: la planta debe permitir la elaboración consecutiva o simultánea de diversos productos, utilizando las mismas instalaciones de forma flexible. Esta situación se podrá dar cuando para la elaboración de los diferentes productos se requieran equipos similares en condiciones de operación diferentes o utilizando diferentes materias primas.

La solución técnicamente más sencilla y económica para cumplir las condiciones indicadas en el párrafo anterior consiste en introducir etapas discontinuas para realizar algunos pasos de la receta (típicamente procesos de reacción, mezcla, separación, etc.). Estas etapas quedarán intercaladas entre otras etapas continuas, que normalmente llevarán a cabo los procesos más sencillos de controlar (movimiento de materiales, calentamientos o enfriamientos, etc.). Se conoce con el nombre de etapas semicontinuas a las que se realizan en equipos continuos trabajando de forma discontinua, ya sea al tratar sucesivamente diferentes productos o bien al funcionar de forma intermitente, al encontrarse intercaladas entre etapas discontinuas¹.

También puede darse el caso de que la utilización de etapas discontinuas sea consecuencia de la propia naturaleza de los productos a elaborar, como ocurre en muchos procesos con etapas bioquímicas (fermentaciones, etc.). En algunas de estas situaciones

¹Por abuso del lenguaje, en estos casos se suele hablar de *equipos semicontinuos*.

sería posible idear un proceso continuo alternativo, pero las cantidades a producir o los sistemas de control que serían necesarios no justificarían las inversiones requeridas.

Una de las características más importantes de las plantas multiproducto que trabajan en operación discontinua es su versatilidad. Este factor debe valorarse especialmente en la delicada situación económica actual que comporta, entre otras cosas, una gran incertidumbre en cualquier previsión que pueda realizarse sobre futuros escenarios de trabajo. Por otra parte, uno de los objetivos básicos de cualquier empresa consiste en servir de la forma más eficiente e inmediata posible al cliente. Para ello es fundamental reducir el ciclo de vida del diseño de los productos, así como lograr la máxima flexibilidad en la producción.

La flexibilidad propia de las plantas en operación discontinua permite hacer frente más fácilmente a situaciones variables de mercado y/o producción, manteniendo unas cotas de calidad y garantía de servicio elevadas. Además de las situaciones que ya se han comentado hasta el momento, se deben citar:

- Variaciones significativas en las características de las materias primas o en su disponibilidad/precio.
- Falta de un conocimiento exhaustivo de lo que ocurre en algunas de las fases de producción (por ejemplo, en algunas reacciones complejas), que puede provocar dificultades de control y/o la necesidad de introducir cambios significativos en las variables de proceso, dando lugar a incertidumbre (por ejemplo, en los tiempos de reacción).
- Estacionalidad y/o incertidumbre en la demanda de los productos.
- Inestabilidad u obsolescencia de los productos, que impida su producción masiva o para *stock*.

De estas características se desprende que las plantas discontinuas serán idóneas para la obtención de productos de alto valor añadido y baja demanda y/o que requieran procesos de síntesis complicados. También pueden ser muy adecuadas para la elaboración de productos con una estacionalidad en la demanda o de aquellos cuya fabricación se pueda efectuar utilizando diversos tipos de equipos (de nuevo, dentro del ámbito de la industria química, estas características se pueden encontrar en subsectores como la industria farmacéutica o la industria petroquímica).

La importancia económica de las plantas que trabajan por lotes se refleja en la cantidad de instalaciones y de productos que se elaboran siguiendo esta forma de funcionamiento: se calcula que éstos representan el 60% del total de los productos típicamente asociados al sector químico, entre los que destacan, por ejemplo, el 80% de los procesos de producción farmacéuticos y el 65% de los relacionados con la alimentación [81]. Pero no es únicamente dentro de este sector donde se valoran las

ventajas de trabajar por lotes: los procedimientos discontinuos son mayoritariamente utilizados en sectores como la metalurgia, la industria papelera, la industria textil, los talleres mecánicos y otras muchas “industrias de proceso” y de fabricación de componentes discretos.

2.2. Definiciones y clasificación

En cualquier industria de proceso, la obtención de un producto implica la realización de una serie de operaciones interconectadas según una secuencia definida denominada *receta*. Cada una de estas operaciones (llenar, calentar, agitar, añadir otro reactivo, decantar, filtrar, esperar, etc.) se conoce con el nombre de *subtarea*. Todas las subtareas que se realizan consecutiva o simultáneamente sobre un mismo equipo formarán una única *tarea*, normalmente identificada por la subtarea más característica².

Cada subtarea, que utiliza unos equipos, unos recursos generales (“servicios”) y una cierta alimentación de materiales para llevar a cabo una transformación determinada, requerirá un tiempo de ejecución que será función de la naturaleza de la subtarea, del equipo donde se realice, de las características de los materiales iniciales y finales, de su relación con el resto de tareas y/o subtareas y de las cantidades a procesar.

Se denomina *línea o camino de producción* a la secuencia de equipos utilizados para la elaboración de un producto, siguiendo la secuencia de tareas definida por la correspondiente receta y con un tiempo de ejecución que puede venir también especificado en la receta, pero que suele depender además del propio camino de producción escogido.

Una planta de funcionamiento discontinuo quedará caracterizada, entre otros, por algunos de los siguientes elementos [86]:

- El número de productos intermedios o finales a obtener y su interdependencia. Atendiendo a este factor, se pueden distinguir:
 - Plantas elaboradoras de un solo producto.
 - Plantas que fabrican varios productos. Dentro de éstas se distinguen dos situaciones:
 - * Los productos son independientes entre sí.
 - * Unos productos a obtener sirven de materia prima de otros.
- La distribución temporal de la demanda de los productos:
 - Plantas con demanda uniforme (invariable a lo largo del tiempo para todos los productos a obtener).

²Dentro de ciertos límites técnicos, la agrupación de subtareas en tareas es una decisión de ingeniería de proceso.

- Plantas con demanda estacional (variable con el tiempo para algunos o todos los productos).
- El tipo de funcionamiento de los equipos. Como ya se ha avanzado, se distinguen:
 - Equipos discontinuos (funcionamiento por cargas): Trabajan siguiendo una secuencia de operaciones que implica, entre otros, un proceso de llenado, una o varias etapas de operación y un proceso de vaciado. Durante cada una de estas secuencias, la cantidad máxima de producto que se puede procesar queda determinada por las características físicas del propio equipo (por ejemplo: volumen, área de secado, ...) y por las características del producto final a obtener.
 - Equipos continuos en funcionamiento semicontinuo: Cuando trabajan, procesan un flujo continuo de material, pero la forma de operar de la planta exige una alternancia de periodos de funcionamiento con otros periodos de parada.
- Los mecanismos de asignación de los equipos a las tareas:
 - De asignación fija: Cada tarea se efectúa en un equipo especificado.
 - De asignación flexible: Cada tarea puede efectuarse en uno o varios tipos de equipos, admitiéndose que varios equipos funcionen en paralelo.
- La estructura de la producción. Se pueden encontrar los siguientes tipos de plantas discontinuas:
 - Plantas que obtienen varios productos similares, con procesos de fabricación y orden de utilización de los equipos semejante: Planta multiproducto (de la terminología inglesa *Multiproduct Plant*).
 - Plantas que obtienen productos distintos con procesos de fabricación y orden de utilización de los equipos diferenciados: Planta multipropósito (de la terminología inglesa *Multipurpose Plant*). Se pueden obtener diferentes productos al mismo tiempo y un mismo producto puede seguir caminos diferentes a través de la planta.
 - Plantas con la estructura de dos o más plantas multiproducto operando en paralelo: Multiplanta (del inglés *Multiplant*).

Estas categorías caracterizan la flexibilidad de la planta desde diferentes puntos de vista y, a su vez, dan idea de la complejidad del análisis necesario para resolver los problemas que presenta cada planta concreta (diseño, planificación, control, CIM, etc.), ya que esta complejidad, en general, crece con el grado de flexibilidad exigido a la planta. Por ejemplo, el grado de desarrollo en las herramientas utilizadas para realizar el diseño de una planta futura está en relación directa con la flexibilidad obtenida en el diseño final. De todas formas, no es probable que una planta real

pueda encuadrarse en una sola de las divisiones indicadas para todos y cada uno de los criterios de clasificación enunciados. En muchas ocasiones el funcionamiento de la planta deberá ser descrito a través de situaciones intermedias, que permitan contemplar adecuadamente la complejidad real del proceso utilizando herramientas sencillas.

Resumiendo, el funcionamiento de una planta discontinua quedará básicamente caracterizado por:

- Sus necesidades de producción (demanda interna y externa).
- Las tareas a realizar y el orden en que deben realizarse para obtener un producto a partir de sus materias primas.
- Los equipos disponibles para realizar estas tareas y las interconexiones posibles.

2.3. Objetivos

En el contexto indicado en el punto anterior, se pueden identificar dos problemas básicos:

1. En primer lugar, se plantea un problema de diseño: dados los requisitos de producción, se deberá determinar la red de proceso y la capacidad de los equipos a utilizar de tal forma que cierta función objetivo (por ejemplo, los costes de capital necesarios) alcance su valor óptimo. Este tipo de problema aparecerá solamente en determinadas circunstancias de la vida de la planta (durante el diseño inicial y durante el estudio de ampliaciones o modificaciones), y de su tratamiento correcto dependerá en gran medida la rentabilidad obtenida. Las diferentes opciones para este tratamiento se describen en el capítulo 3.
2. En segundo lugar, debe analizarse el problema de la planificación de la producción y secuenciación de tareas: dadas las especificaciones de la planta y ciertos requisitos de producción, determinar cuándo y en qué cantidades se deben fabricar los diversos productos (plan maestro de producción), decidir en qué equipos se deben llevar a cabo las diversas tareas del proceso (asignación de tareas) y el orden más adecuado para hacerlo (secuenciación de operaciones), integrando otras tareas no relacionadas con la fabricación de un producto concreto (por ejemplo, el mantenimiento preventivo) para poder estimar finalmente en qué momento deben comenzar y finalizar tales tareas. Este problema, cuyo adecuado tratamiento es básico para el funcionamiento "día a día" de la planta, se describe y analiza en el capítulo 4, presentándose herramientas adecuadas para asistir al responsable de producción en la planificación a corto y medio plazo.

Ambos problemas no son independientes. Los modelos simplificados utilizados para establecer la estructura de la planta y la capacidades óptimas de los equipos a instalar no entran en los detalles de funcionamiento de la planta ni en la evaluación económica

de la producción, por lo que es posible que determinados aspectos (por ejemplo, la estacionalidad de la demanda de un producto) provoquen conflictos no previstos. Mediante la aplicación de una metodología de planificación sobre los resultados preliminares de diseño se puede evaluar la capacidad real de la planta y su flexibilidad frente a posibles cambios de especificaciones respecto a las condiciones nominales.

El concepto de flexibilidad debe estar presente en el momento de plantearse cualquier inversión en nuevos equipos, ya sea para abrir una nueva línea de producción o para modificar la capacidad de producción de líneas ya existentes. En la etapa de diseño no se deben especificar solamente las condiciones de producción nominales, sino que también debe contemplarse la facilidad con que la nueva instalación puede adaptarse a diversas situaciones de mercado, políticas económicas, y otras circunstancias que suelen afectar al funcionamiento de la planta a medio e incluso a corto plazo. La flexibilidad necesaria para adaptarse a esta diversidad de situaciones permite plantear diferentes alternativas válidas de fabricación en cada circunstancia. Por tanto, se deben establecer procedimientos de planificación de la producción que permitan elegir entre estas alternativas, utilizando los equipos y recursos disponibles de forma que se obtenga el beneficio máximo (productividad, satisfacción del cliente, coste mínimo, etc.). Dada la gran variedad de mercados, formas de operación y de utilización del equipo disponible, factores económicos, políticas de empresa, etc., que se presentan, la resolución de este problema puede requerir diferentes procedimientos y herramientas.

En esta tesis se plantea el desarrollo de procedimientos sencillos que permitan abordar la resolución de estos problemas en el caso de plantas multiproducto.

2.4. Conceptos básicos para el estudio de sistemas discontinuos

2.4.1. Generalidades

En el caso más general, una planta química discontinua se puede considerar como un conjunto interconectado de equipos de proceso de varios tipos y tamaños, capaz de llevar a cabo una serie de tareas diferentes en modo de operación discontinuo o semicontinuo. Estas plantas de producción comprenden generalmente varios grupos de equipos que pueden diferir en el tipo, en el material de construcción, en las características técnicas y en los servicios generales requeridos.

Un sistema discontinuo puede contener, entre otros tipos de equipo, reactores, filtros, bombas, secadores, cristalizadores, tanques de almacenaje, intercambiadores de calor, etc. Habitualmente, la descripción de estos equipos a nivel general puede realizarse a través de una serie de características básicas, entre las que destacan el tipo de equipo (que permitirá identificar las tareas que se pueden hacer o no en cada uno de ellos) y una magnitud representativa de su capacidad para realizar las tareas que

le sean encomendadas (en el caso de un reactor, su volumen, en el caso de un filtro, el área de filtrado, etc.).

Ciertas características de las unidades están frecuentemente normalizadas, *v.g.* en cuanto a tamaño y otras especificaciones. Lo mismo ocurre con los materiales de construcción, que se suelen escoger dentro de una serie de materiales estándar de forma que se cumplan las condiciones requeridas por el proceso (estabilidad química frente a las sustancias presentes, resistencia a las condiciones de presión y temperatura especificadas para el proceso, coste, etc.).

Las tareas a realizar tienen como objetivo elaborar lotes de productos. Generalmente dichos lotes o cargas se agrupan en campañas de duración apropiada que se repiten periódicamente. Un producto particular puede aparecer en varias campañas, y la duración de la campaña depende de los requisitos inherentes a cada producto individual.

Como consecuencia del proceso productivo se presentan a lo largo del mismo diferentes sustancias, que habitualmente se agrupan en cinco clases:

- **Productos finales:** de venta a clientes externos o que se transfieren a otras plantas de la misma firma. Su elaboración es el objetivo del sistema productivo.
- **Productos base:** se compran a los proveedores para ser utilizados como materia prima en la propia planta aunque, en determinadas circunstancias, también pueden ser objeto de venta.
- **Productos intermedios:** se producen en la planta para ser utilizados como materia prima en la fabricación de otros productos dentro de la misma planta. Al igual que los productos base, pueden ser objeto de venta a clientes externos.
- **Subproductos:** se forman como resultado del proceso productivo y, aunque su fabricación no es el objetivo de dicho proceso, tienen un cierto valor por lo que son susceptibles de ser vendidos para obtener un beneficio adicional.
- **Efluentes y residuos:** se forman como resultado del proceso productivo y su eliminación supone un cierto coste para la empresa.

2.4.2. Tareas y recetas

Tal como se ha definido anteriormente, la receta deberá contener la información adecuada para identificar completamente la secuencia de tareas (o subtareas) necesarias para obtener un cierto producto y las condiciones de operación ideales para realizarlas correctamente. Entre otros aspectos, la receta debe describir:

- Las etapas químicas y físicas necesarias, el orden en el que deben realizarse, las subtareas necesarias para llevarlas a cabo y las condiciones necesarias para considerarlas terminadas.
- Los recursos necesarios para realizar cada etapa o subtarea.
- Las posibilidades de asignación de cada etapa a los diferentes equipos.

Cada subtarea tiene un factor de tamaño asociado (S , del inglés *Size Factor*) que se define como:

$$S = \frac{\text{cantidad procesada en la subtarea}}{\text{cantidad de producto final}} \quad (2.1)$$

y que se puede calcular a partir de la receta mediante un simple balance de masa: es la cantidad de producto intermedio necesaria para obtener cada unidad de producto final.

Agrupando todas las subtareas que se realizan en un mismo equipo, se puede definir el factor de tamaño del producto i en la tarea j (S_{ij}) como el máximo de todos los factores de las subtareas comprendidas.

Si se define la capacidad de un equipo como la cantidad de producto intermedio que puede procesar dicho equipo en una sola carga, de la ecuación (2.1) se deduce la capacidad necesaria para obtener una determinada cantidad de producto final, que se podrá calcular multiplicando el factor de tamaño correspondiente a la tarea a realizar en ese equipo por la cantidad de producto final que se desea obtener en cada lote. Dicho de otra forma, para una cierta asignación de tareas a equipos, el tamaño de cada carga quedará limitado por la etapa de producción que tenga una relación inferior entre la capacidad así definida y el correspondiente factor de tamaño (figura 2.1).

En plantas donde deben fabricarse varios productos, la definición anterior da lugar a imprecisiones: si un determinado equipo debe realizar tareas de diferentes productos finales, el producto intermedio a procesar en cada caso puede que no tenga siempre las mismas características, por lo que se deberán identificar diferentes capacidades de proceso para un mismo equipo. Para evitar esta situación, se introduce un factor de corrección en el propio factor de tamaño, que tiene en cuenta el tamaño de equipo (ahora ya definido como una característica física del propio equipo) necesario para tratar una unidad de producto intermedio. Con esta corrección, el factor de tamaño queda ligado a un determinado tipo de equipo trabajando en unas determinadas condiciones, por lo que modificaciones en la asignación de tareas a equipos implicarán modificaciones en los factores de tamaño a aplicar en los cálculos de capacidad.

El problema se complica si las unidades disponibles para una tarea específica no son idénticas o pertenecen a diversos tipos. En estos casos, la restricción anterior reduce la flexibilidad potencial de la planta discontinua en lo que se refiere a la capacidad de fabricar un mismo lote por varias rutas diferentes, pero aumenta su capacidad de

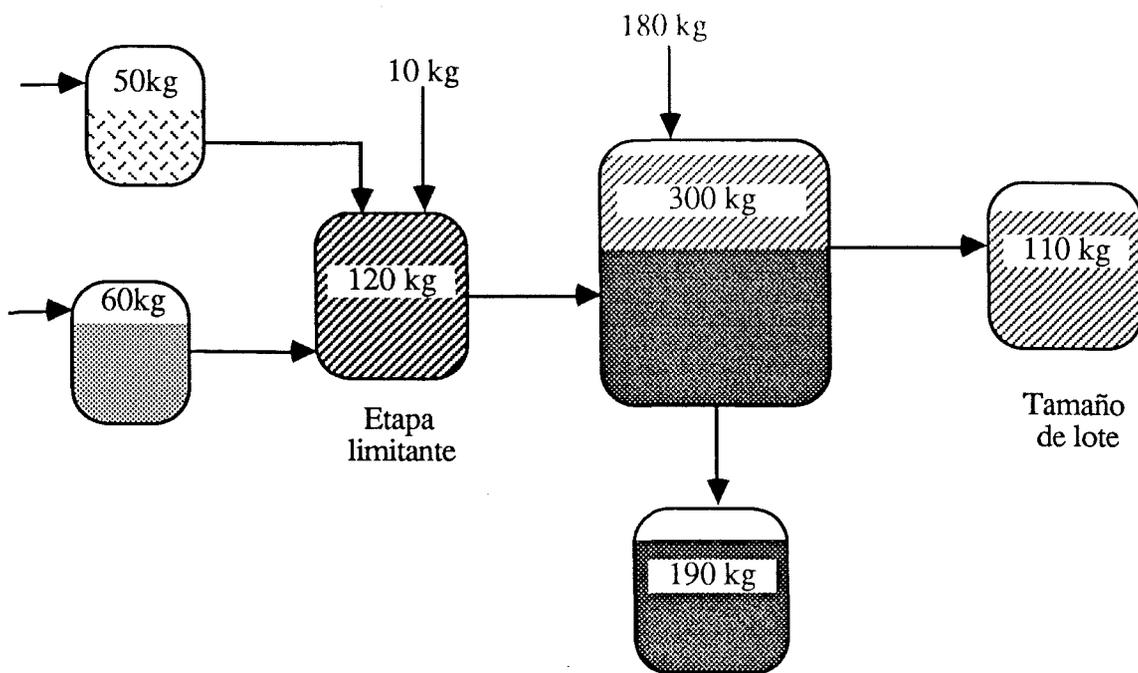


Figura 2.1. Esquema de producción. Etapa limitante del tamaño de lote.

tratar de forma eficiente lotes de diferentes productos o de distintas cantidades de un mismo producto.

La asignación de tareas a equipos y la descripción del proceso determinarán la secuencia de operaciones a realizar en cada equipo (secuenciación de tareas), que incluirá información referente a tiempos de reacción, velocidades de transferencia, tiempos de calentamiento y enfriamiento, etc. El llamado Diagrama de Gantt (figura 2.2) consiste en una representación gráfica que muestra el nivel de utilización de las unidades de proceso y almacenaje por los diversos productos a lo largo del tiempo.

Se define el tiempo total de proceso como el tiempo mínimo necesario entre el comienzo de la acción inicial de un lote o carga y el final de la última acción relacionada con la misma carga. Durante la operación de la planta en condiciones reales, este tiempo puede quedar modificado por eventuales faltas de disponibilidad de los recursos productivos.

El tiempo medio comprendido entre la salida de dos lotes de un mismo producto, cuando la planta trabaja prioritariamente en la elaboración de ese producto, es el llamado tiempo de ciclo limitante (LCT, del inglés *Limiting Cycle Time*). En este valor no se consideran los retrasos derivados de la puesta en marcha de la planta (el primer lote necesita al menos del tiempo total de proceso para quedar acabado), y/o de

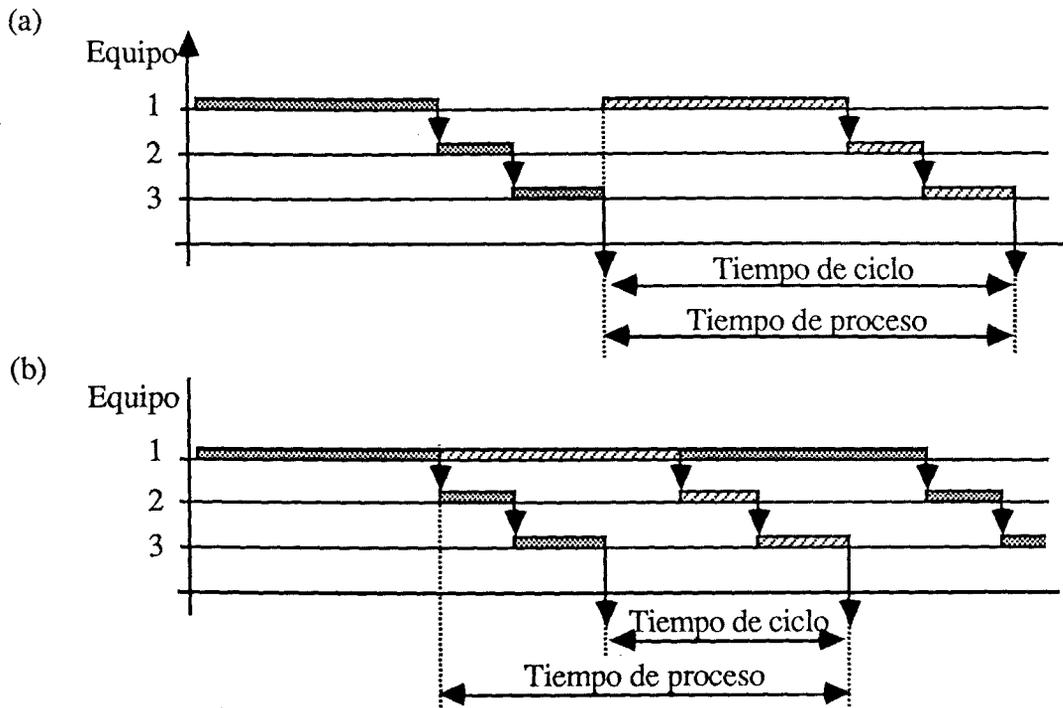


Figura 2.2. Diagrama de Gantt mostrando el tiempo de proceso y el tiempo de ciclo limitante: a) En operación sin solapamiento. b) En operación con solapamiento.

eventuales cambios de producto, aunque asume las posibles faltas de periodicidad en la producción (por ejemplo, debido a falta de disponibilidad de los servicios generales) realizando una media de un número suficiente de ciclos productivos.

La relación entre el tiempo de ciclo limitante y el tiempo de proceso depende de la forma de operar de la planta, en aspectos como la disponibilidad de recursos, el margen de seguridad que se desee dejar entre lotes para compensar posibles desviaciones respecto a los tiempos de proceso nominales, etc. Así por ejemplo, si cada equipo se utiliza una sola vez en cada lote y se considera disponible para otra tarea en cuanto acaba la operación, el tiempo de ciclo limitante será el máximo de los tiempos necesarios para cada una de las tareas (figura 2.2.b):

$$T = \max_j \{t_j\} \quad (2.2)$$

donde t_j es el tiempo total para procesar un lote en el equipo j . El siguiente lote puede comenzar el proceso sin necesidad de esperar a que se haya finalizado la producción del lote anterior, por lo que se habla de operación con solapamiento (existen situaciones en las que es conveniente esperar el final de un lote antes de comenzar a trabajar en el siguiente, hablándose entonces de operación sin solapamiento).

La productividad de una planta discontinua viene definida por la relación entre la cantidad producida en cada lote y el tiempo que transcurre entre la salida de dos lotes consecutivos. Evidentemente, esta productividad dependerá del producto y de las circunstancias de fabricación (del camino de producción utilizado, de la forma de resolver los conflictos que hayan podido surgir entre los diferentes lotes en cuanto a utilización de recursos, etc.). En la mayoría de las situaciones industriales se habla únicamente de productividades medias para toda la planta aunque, en casos complejos, puede ser necesario distinguir entre las productividades obtenidas según los diferentes caminos de producción.

2.4.3. Características estructurales

Tal como se mencionará más adelante (problema de síntesis), el elemento básico que controla el proceso de producción es el tiempo de ciclo limitante de cada producto (LCT). El LCT es, de hecho, el cuello de botella que limita la utilización de los equipos en el proceso. La red de proceso ideal contemplaría todas las etapas plenamente utilizadas a lo largo del LCT. Sin embargo, las diferencias entre tiempos de proceso de unidades de equipo individuales hace imposible el obtener tal red ideal en casos reales. Con todo, los tiempos muertos y el mismo LCT pueden reducirse sustancialmente utilizando estrategias adecuadas, entre las que destacan:

- Utilización de unidades en paralelo fuera de fase.
- Combinación y descomposición de tareas.
- Modificación de las reglas de transferencia entre tareas.
- Utilización de almacenaje intermedio.

El uso de unidades en paralelo fuera de fase para reducir el LCT puede comprenderse mejor observando la figura 2.3. Debe notarse que la adición de unidades en paralelo fuera de fase implica no solamente la reducción en LCT sino que también puede permitir una reducción en los tamaños de otros equipos implicados, afectando tanto a las decisiones de ingeniería de diseño como a las de operación de la planta, tanto más cuanto mayor sea el coste de los equipos implicados.

La estrategia seleccionada para añadir unidades en paralelo afectará también a la flexibilidad de producción de la planta frente a un mercado sujeto a condiciones de demanda cambiante. Por ejemplo, al añadir unidades en paralelo idénticas en una cierta etapa se generarán varios caminos de producción alternativos, pero por todos ellos se obtendrá el mismo tamaño de lote. En cambio, la utilización de unidades no idénticas puede dar lugar a caminos de producción con tamaños de lote diferentes. La selección adecuada de las capacidades de las unidades en paralelo fuera de fase que se incorporan a una determinada etapa del proceso es un problema complejo de diseño y

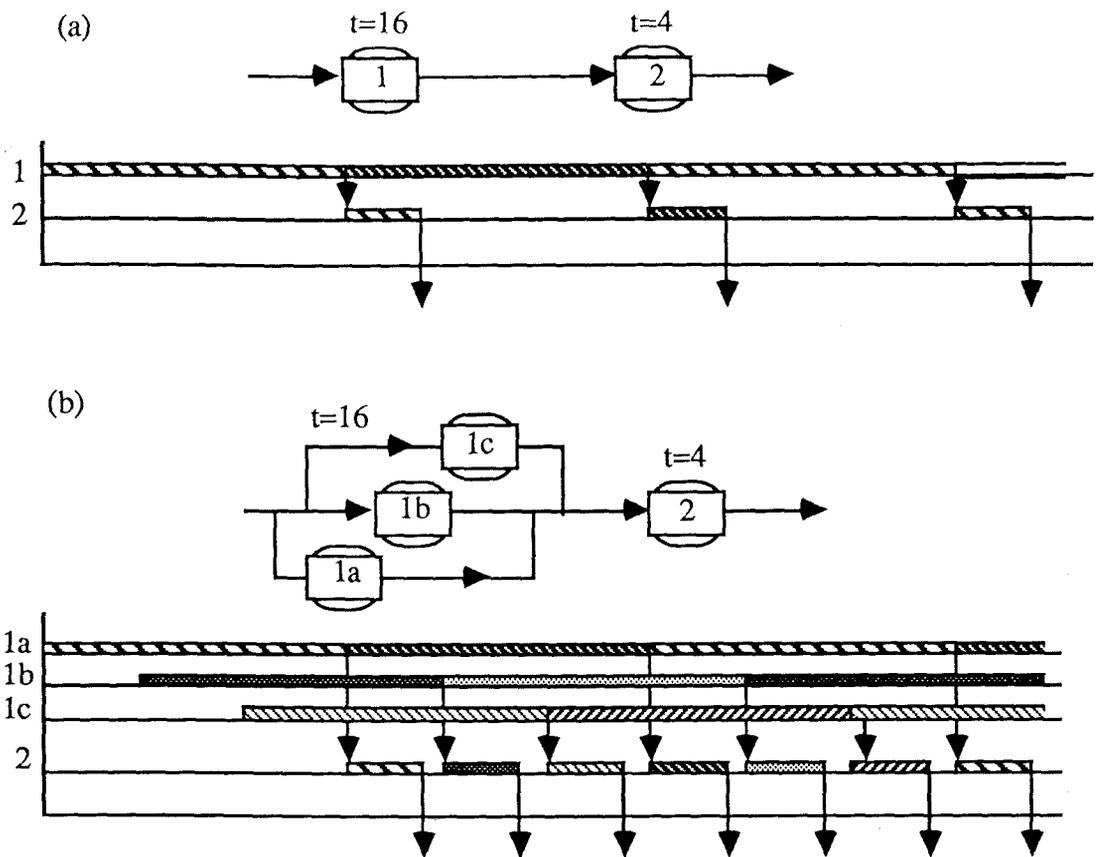


Figura 2.3. Ejemplos de adición de unidades en paralelo fuera de fase para reducir el tiempo de ciclo.

operación, de interés prioritario para la gestión global de la planta.

Resultados similares pueden obtenerse mediante la descomposición del conjunto de subtarefas asignado a cierto equipo discontinuo. En la figura 2.4 se observa que gracias a esta estrategia es posible reducir el LCT, lo cual permitirá un aumento de productividad o la reducción de los tamaños de los equipos implicados.

Un procedimiento para reducir los tiempos muertos consiste en la combinación de tareas consecutivas. La combinación de tareas no suele permitir disminuciones en el LCT (en todo caso, una combinación incorrecta puede provocar aumentos no deseados del LCT), pero reduce el número total de unidades de proceso necesarias, permitiendo la disminución de los costes de inversión (figura 2.5).

Una forma más general de combinación incluye la posibilidad de realizarla entre tareas no consecutivas. Si la suma de tiempos asignados a las tareas que se combinan no sobrepasa el LCT original, mediante una planificación adecuada se puede conseguir que el LCT quede inalterado mientras se reduce el coste de los equipos utilizados

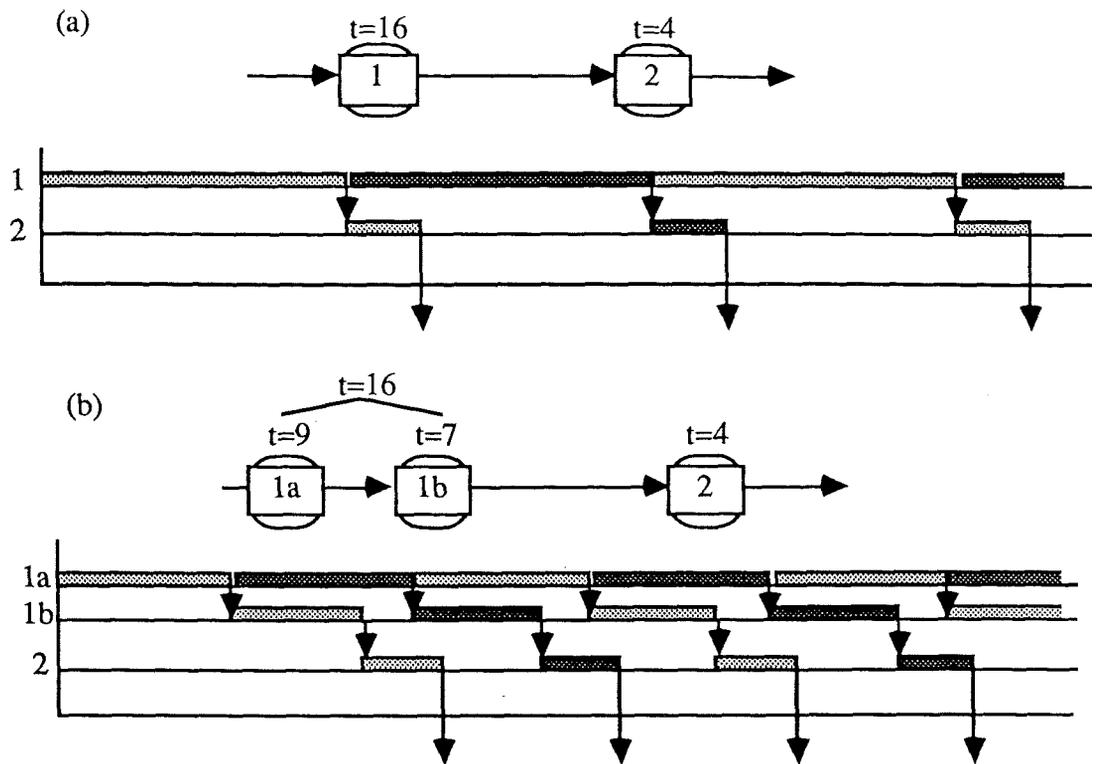


Figura 2.4. Ejemplo de descomposición de una tarea. La tarea 1 se divide en 1a y 1b, obteniéndose una reducción en el LCT.

al eliminarse uno de ellos. Esta estrategia, de hecho, queda englobada en lo que habitualmente se denomina "reutilización de equipos". Para ello se pueden utilizar dos formas de operación:

- Operación en "semislapamiento": si la tarea j' y la tarea j'' son las que utilizan el mismo equipo ($j' < j''$), no se puede realizar la tarea j' del siguiente lote hasta que no se haya finalizado la tarea j'' del lote en curso. En el bucle (unidades que realizan las tareas de la j' a la j'') no puede haber más de un lote en cada momento, por lo que al calcular el tiempo de ciclo limitante hay que añadir el término que resulta de sumar todos los tiempos de proceso del bucle, $\sum_{j=j', j''} t_j$. En la figura 2.6.a se puede observar un ejemplo de combinación de tareas no consecutivas en "semislapamiento".
- Operación sin restricciones: el resultado en este caso puede ser mucho más eficiente, como se observa en la figura 2.6.b, donde el tiempo limitante ha pasado de 44 a 24 unidades. Sin embargo, pueden aparecer conflictos si existe la posibilidad de que las dos tareas requieran el equipo compartido simultáneamente. La introducción de un sistema de almacenaje intermedio puede desacoplar los dos subprocesos que operan alternativamente en el mismo equipo, permitiendo, en primer lugar, el intercambio entre las cargas consecutivas que utilizan dicho equipo, y en segundo lugar, la introducción de tiempos de espera hasta que el

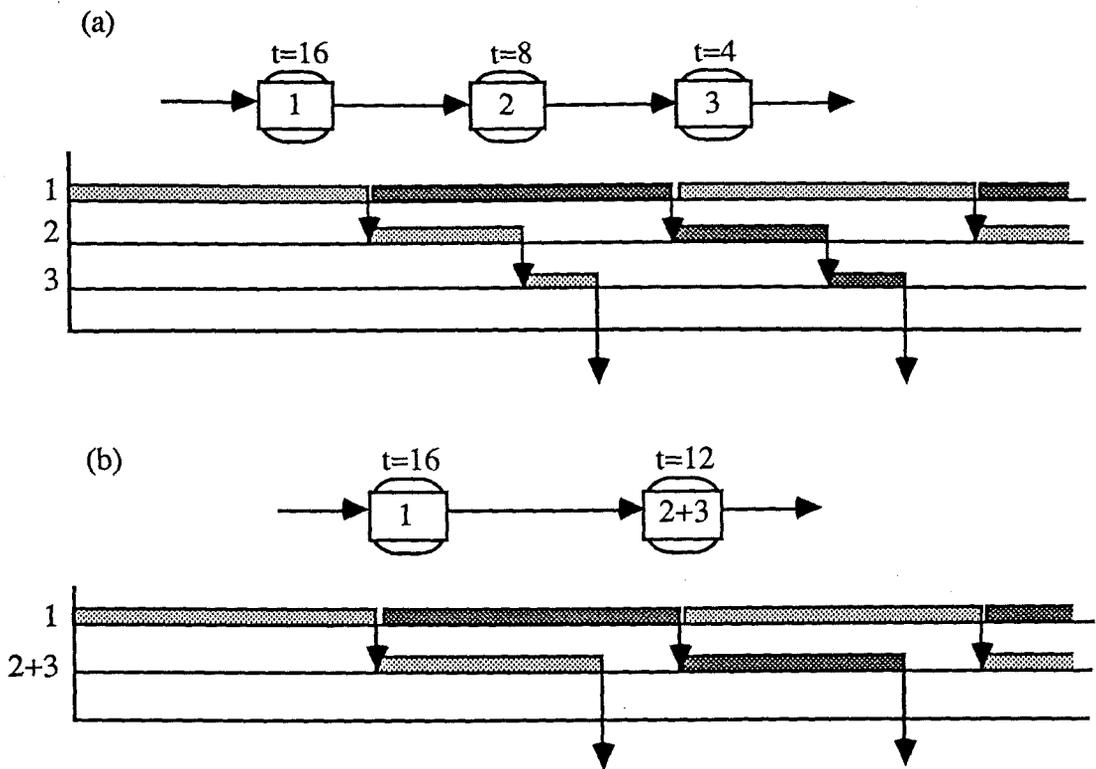


Figura 2.5. Ejemplo de combinación de tareas consecutivas.

equipo compartido quede disponible. En la figura 2.7 las tareas B y D requieren el mismo equipo 2. El tanque de almacenaje AI se ha introducido para permitir la reutilización de la unidad 2 para la tarea D , con lo que el tiempo de ciclo LCT pasa a ser $t_B + t_D = t_{AI} + t_D$.

Todo el cálculo se complica aún más al considerar los tiempos de transferencia, durante los cuales quedan simultáneamente ocupados el equipo que se llena y el que se vacía, por lo que situaciones como la planteada en la figura 2.6.b no serán factibles si no existe un sistema de almacenaje intermedio.

Por último, la introducción dentro de la línea de producción de equipos que permitan el almacenaje de productos intermedios puede aportar notables mejoras en la utilización del resto de los equipos instalados. La situación de los equipos de almacenaje dentro del camino de producción definirá una serie de divisiones del mismo en subprocesos, y la capacidad de almacenaje determinará el alcance del desacoplamiento entre dichos subprocesos. Así, puede introducirse la capacidad suficiente para que los tiempos de ciclo y los tamaños de lote queden desacoplados entre cada uno de los subprocesos para que operen de forma totalmente independiente, o bien instalar un sistema de almacenaje de capacidad más limitada que impondrá restricciones adicionales de productividad.

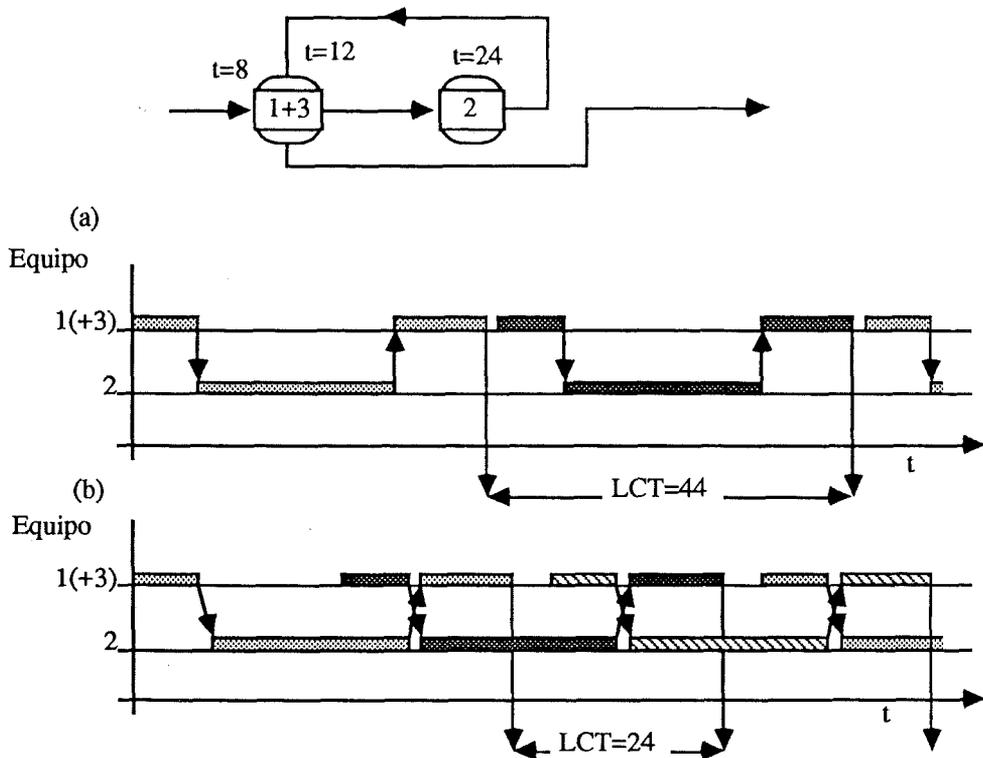


Figura 2.6. Combinación de tareas no consecutivas: a) Operación en semisolapamiento. b) Operación sin restricciones.

2.4.4. Estrategias de transferencia de material entre tareas

Uno de los pasos más delicados dentro de un proceso discontinuo se produce en el momento en que, después de haber finalizado una determinada etapa j , el producto intermedio resultante debe trasladarse a otro equipo para la realización de la etapa $j + 1$. La estabilidad de dicho producto intermedio y la disponibilidad de los equipos adecuados en el momento oportuno imponen una serie de restricciones que se deben cumplir simultáneamente. Estas restricciones quedan generalmente enmarcadas dentro de alguna de las siguientes situaciones:

ZW (*Zero Wait*), Tiempo de Espera Nulo: no es admisible ninguna espera entre el final de esta etapa y el inicio de la siguiente (figura 2.8.a). Esta situación se suele dar cuando se trata un producto inestable.

FW (*Finite Wait*), Tiempo de Espera Limitado: no puede transcurrir más de un cierto tiempo entre el final de la etapa y el inicio de la siguiente.

NIS (*No Intermediate Storage*), Sin Almacenaje Intermedio: si el siguiente equipo no está disponible es admisible la espera, pero no existen equipos adecuados para

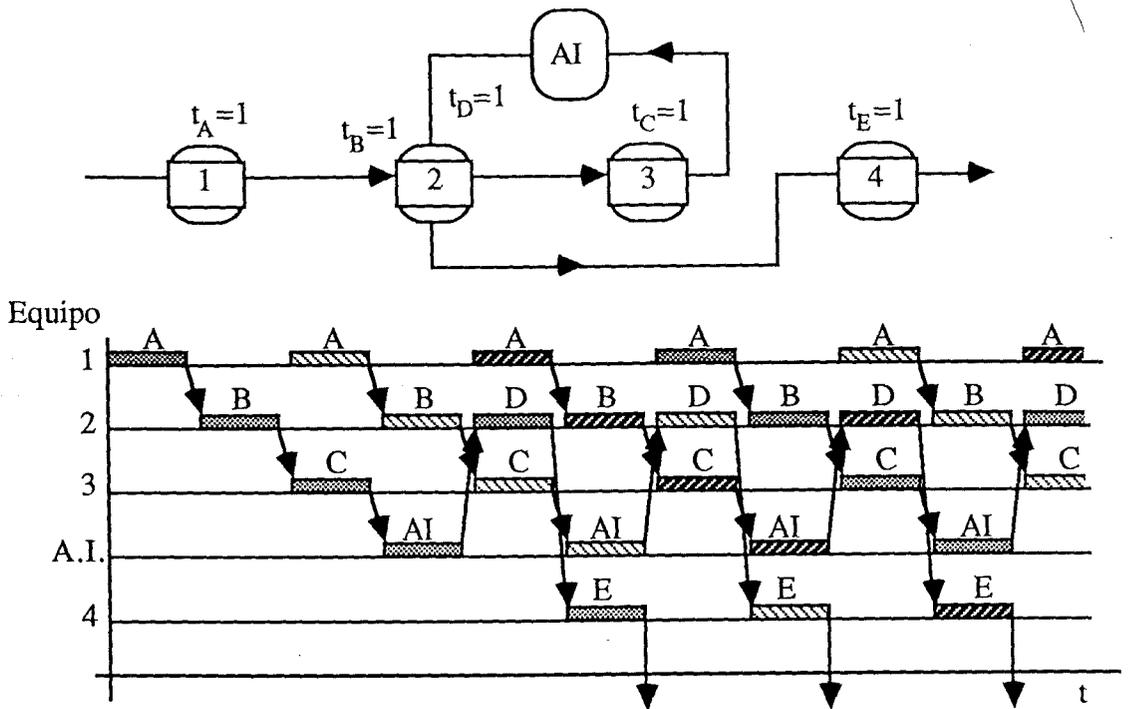


Figura 2.7. Combinación de tareas no consecutivas con conflictos de tiempo.

el almacenaje por lo que, en todo caso, se deberá utilizar el equipo donde se ha realizado la operación, que continuará ocupado mientras no se traslade el material a otro equipo para la siguiente tarea (figura 2.8.b). La probabilidad de retención del material en proceso introduce flexibilidad temporal.

UIS (*Undefinite Intermediate Storage*), Almacenaje Intermedio Ilimitado: si el siguiente equipo no está disponible, es admisible la espera y existe una capacidad de almacenaje ilimitada, con lo que el equipo que ha realizado la última tarea quedará disponible inmediatamente después de acabado el proceso, salvo que sea necesaria una limpieza (figura 2.8.c).

FIS (*Finite Intermediate Storage*), Almacenaje Intermedio Limitado: al igual que en el caso anterior, es admisible la espera, pero la capacidad de almacenaje es limitada (en cantidad o en número de productos que se pueden almacenar simultáneamente), por lo que en ocasiones, si el siguiente equipo no está disponible y el sistema de almacenaje está ocupado, no será posible liberar inmediatamente el equipo que acaba de realizar una tarea (NIS). Cuando la cantidad límite de almacenaje es suficientemente grande, la situación es equivalente a la de UIS.

En la práctica, cada etapa de proceso estará sujeta a diferentes reglas de transferencia. En tal caso, se dice que la red de proceso opera bajo condiciones de Almacenaje Intermedio Mixto (MIS, del inglés *Mixed Intermediate Storage*).

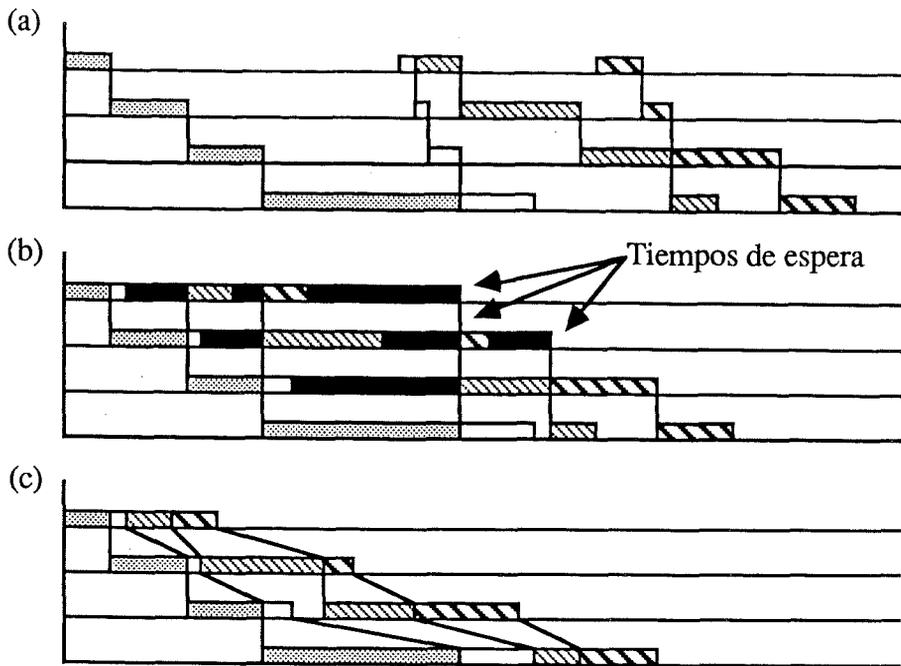


Figura 2.8. Reglas de transferencia entre tareas ZW, NIS y UIS: a) No se admiten esperas (ZW). b) No se dispone de equipos de almacenaje (NIS): los equipos anteriores quedan libres antes, permitiendo ahorros en el tiempo total de proceso. c) La capacidad de almacenaje es ilimitada (UIS): los equipos quedan disponibles inmediatamente después de acabada la operación, con lo que los ahorros de tiempo son aún mayores.

2.5. La línea de producción y sus elementos. Cálculos básicos

El proceso para la obtención de un producto determinado requiere una información precisa que defina la secuencia de tareas que deben ser realizadas (receta). La consideración de las diversas características asociadas a los sistemas discontinuos y la existencia de políticas de transferencia alternativas entre tareas consecutivas puede dar lugar a "líneas de producción competitivas". Cada línea de producción consistirá en unidades de equipo y almacenaje intermedio asignadas a la fabricación de un producto determinado. La producción se realizará en una secuencia de cargas (cuyo tamaño puede ser o no idéntico) que, en función de sus características, pueden dar lugar a una periodicidad en la utilización de recursos.

Se conoce como *tren de producción* a la secuencia de equipos utilizados de forma sucesiva en la elaboración de un producto sin interrupciones debidas a la presencia de equipos de almacenaje intermedio. Cada tren tendrá por tanto asignado un subconjunto de tareas de la receta para fabricar cierto producto. Cualquier subconjunto de equipos discontinuos o semicontinuos en un tren se denominará *subtren*. Un conjunto de unidades semicontinuas asociadas que deban operar simultáneamente se denomina *subtren semicontinuo*. De forma similar, una unidad discontinua y los subtrenes semi-

continuos que sirven para transferir materiales desde y hacia la unidad discontinua forman un *subtren discontinuo*.

2.5.1. Dependencia entre las etapas discontinuas y las semicontinuas

El uso de tareas discontinuas y semicontinuas a lo largo de la línea de producción establece una dependencia entre los dos tipos de unidades que las realizan. Los procesos semicontinuos implican entrada y salida simultánea de material, sin acumulación del mismo en el equipo que los realiza. Como consecuencia, las unidades discontinuas anteriores y posteriores a una unidad donde se realice una tarea semicontinua estarán ocupadas todo el tiempo de operación de dicha tarea. La figura 2.9 muestra cómo la unidad 2 queda ocupada mientras funcionan las unidades 1, 3 y 4. El tiempo de funcionamiento de la unidad 2 incluirá el de llenado, simultáneo al vaciado de la unidad discontinua anterior e idéntico al de operación de la unidad 1, el tiempo de proceso para la operación discontinua y el vaciado en el equipo posterior.

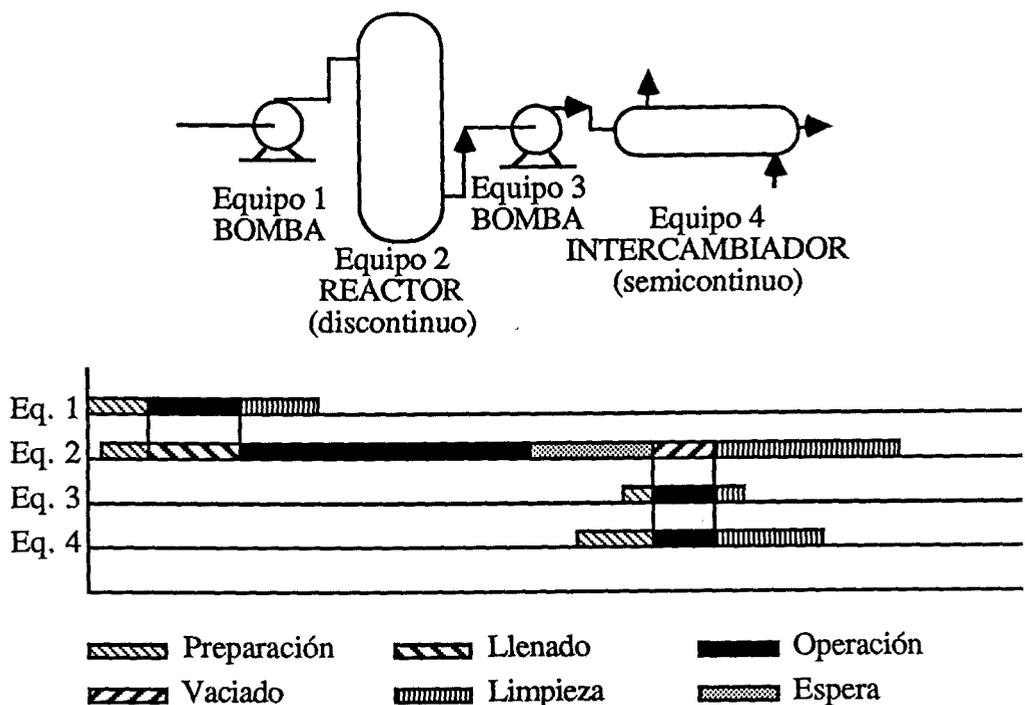


Figura 2.9. Dependencia entre las etapas discontinuas y las semicontinuas.

2.5.2. Tiempo de proceso

El "tiempo de proceso" (P_j) es el tiempo necesario para llevar a cabo una tarea j . A menudo puede calcularse como la suma de un término constante y de otro variable,

dependiente este último de la cantidad de material manipulado (por ejemplo, proporcional al tamaño de carga) y de la naturaleza de la unidad utilizada (intercambiador, reactor encamisado, etc.).

El tiempo de proceso puede ser también función de variables como la conversión en caso de reacción: $P_j = f(\text{Conversión})$.

Para utilizar este tiempo de proceso en el cálculo del tiempo mínimo que debe transcurrir entre cargas sucesivas de un mismo producto (tiempo de ciclo limitante) se deben incluir los tiempos de llenado y vaciado de la unidad asignada, y otros factores estructurales antes comentados, como la existencia de equipos en paralelo operando en fase o fuera de fase, las combinaciones de tareas no consecutivas, si el modo de operación es con solapamiento o sin él, etc. Por ejemplo, de la figura 2.3 se desprende que el tiempo total necesario para realizar una tarea j a la que se le han asignado m_j^o unidades discontinuas idénticas operando en paralelo fuera de fase puede calcularse según:

$$t_j = \frac{\theta_j^f + P_j + \theta_j^e}{m_j^o} \quad (2.3)$$

donde

θ_j^f es el tiempo de llenado de la unidad.

P es el tiempo de proceso.

θ^e es el tiempo de vaciado de la unidad.

Las etapas de llenado y vaciado requieren habitualmente la participación de un equipo que trabaje de forma semicontinua, transfiriendo el material desde el equipo anterior o hasta el equipo siguiente. Por tanto, θ^f y θ^e serán a su vez los tiempos de proceso de los equipos involucrados. Por conveniencia, se distinguirá entre el tiempo requerido por una tarea semicontinua k , θ_k , y el tiempo requerido por una operación discontinua j , t_j . Por tanto, la escritura de la ecuación (2.2), que permitía obtener el tiempo de ciclo limitante en operación con solapamiento, deberá modificarse cuando el producto a obtener implique la realización de etapas discontinuas y semicontinuas, según:

$$T = \max_j \{\theta_j, t_j\} \quad (2.4)$$

Como puede verificarse fácilmente [109], la presencia de unidades en paralelo trabajando en fase no altera el tiempo de ciclo equivalente del conjunto.

2.5.3. Combinación de tareas

Considérese ahora la posibilidad de combinar tareas no consecutivas. La figura 2.10 muestra la combinación de las etapas r y s no consecutivas, precedidas por el subtren

a. El subtren k está localizado entre las etapas combinadas. Llamando m al subtren que incluye r , k y s , el tiempo de ciclo global se calculará según:

$$T = \max\{T_a, T_m, T_b\} \quad (2.5)$$

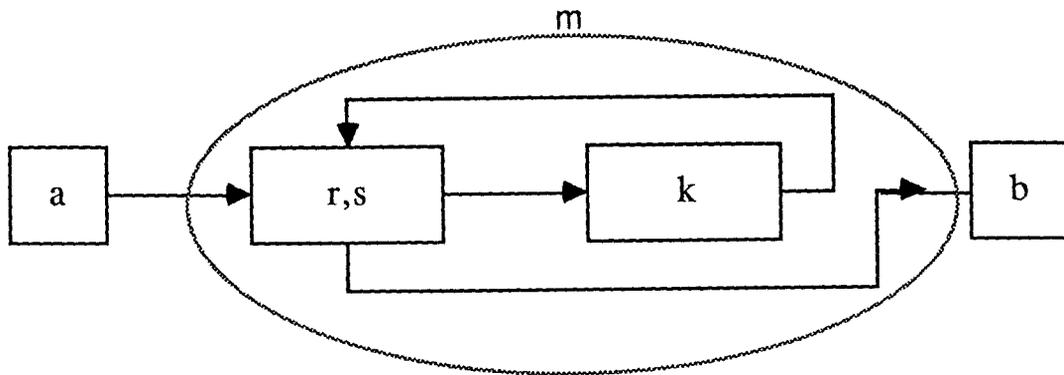


Figura 2.10. Cálculo del tiempo de ciclo al combinar tareas no consecutivas en semisolapamiento.

Trabajando en modo de operación de semisolapamiento, el subtren m queda afectado por una sola carga cada vez, con lo que:

$$T_m = t_r + \sum_{j \in k} t_j + t_s \quad (2.6)$$

donde t_j son los tiempos en cada etapa que pertenecen al subtren k . Según este modo de operación, las etapas r y s así como las etapas intermedias que pertenecen a k se pueden procesar sin ninguna necesidad de retraso o almacenaje auxiliar.

Un modo más eficiente de combinar tareas no consecutivas consiste, como ya se ha indicado, en permitir la presencia simultánea de varios lotes dentro del bucle provocado por la reutilización. En este caso, el tiempo equivalente se puede calcular según:

$$T_m = \max\{t_r + t_s, \max_{j \in k}\{t_j\}\} \quad (2.7)$$

Esta mejora en el tiempo de ciclo, puede requerir la introducción de tiempos de espera en el proceso de las etapas intermedias e incluso la instalación de equipos auxiliares de almacenaje. La condición para la cual se produce retraso o necesidad de almacenaje, si no se consideran los tiempos de transferencia entre equipos y la operación es cíclica, viene determinada por las siguientes relaciones [109]:

Sea N el número de lotes que se están procesando en el subtren k al acabar una nueva tarea r . Este número se podrá calcular como:

$$N = \text{int} \left[\frac{\sum_{j \in k} t_j}{T} \right] \quad (2.8)$$

En ese momento, el siguiente lote que tiene pendiente de realizar la tarea s comenzará dicha tarea al cabo de π unidades de tiempo, siendo π es el resto del cociente anterior:

$$\pi = \text{mod} \left\{ \sum_{j \in k} t_j, T \right\} \quad (2.9)$$

Como puede observarse en la figura 2.11.a, dicha tarea s acabará en $t = \pi + t_s$, mientras que la tarea r del lote siguiente comenzará en $t = T - t_r$. Por tanto, para evitar la coincidencia entre ambas tareas, debe cumplirse que:

$$\pi + t_s \leq T - t_r \quad (2.10)$$

Si esta desigualdad no se cumple (figura 2.11.b), deberá prolongarse el tiempo de estancia en el subtren k para que π vuelva a ser nulo, introduciendo tiempos de espera Δ en k . Obviamente, el tiempo total de retraso requerido en estas condiciones es $T - \pi$, por lo que finalmente:

$$\Delta = \begin{cases} 0 & \text{si } \pi + t_r + t_s \leq T \\ T - \pi & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.11)$$

Si los tiempos de espera no pueden repartirse entre las diferentes tareas del subtren k sin que alguna de ellas supere el tiempo de ciclo T , será necesario introducir tareas específicas de almacenaje, con sus respectivos equipos. Evidentemente, si no se requieren tiempos de espera ($\Delta = 0$), o la espera puede realizarse en los equipos ya instalados (NIS), no será necesario el almacenaje.

2.5.4. Utilización de equipos de almacenaje intermedio

Considerando el uso de almacenaje intermedio para desacoplar diferentes zonas del proceso productivo, incluso en una planta que solamente elabore un producto pueden llegar a distinguirse dos o más subprocesos.

El balance de materia entre los trenes desacoplados por un equipo de almacenaje intermedio (figura 2.12) requiere el mantenimiento de las productividades entre dichos trenes anterior y posterior. En caso contrario, la programación de un número indefinido de lotes en la planta provocaría la acumulación de producto en el equipo de almacenaje (si la productividad del tren anterior fuera la mayor) o la falta de material para el tren posterior (si éste fuera el que presentase mayor productividad). Por tanto, dado que la productividad puede calcularse como el cociente entre el tamaño de lote B y el tiempo

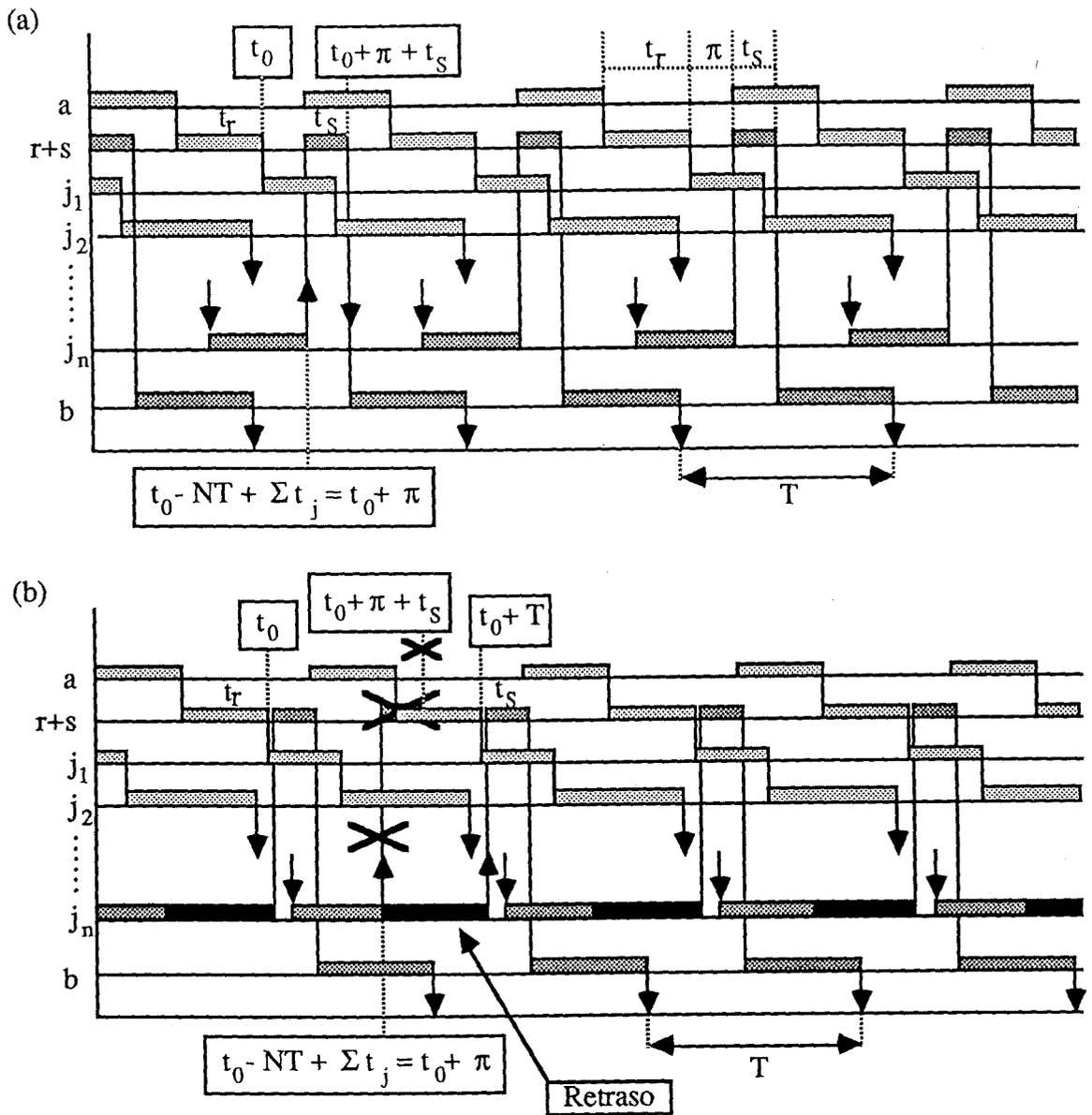


Figura 2.11. Retraso necesario para la combinación tareas no consecutivas.

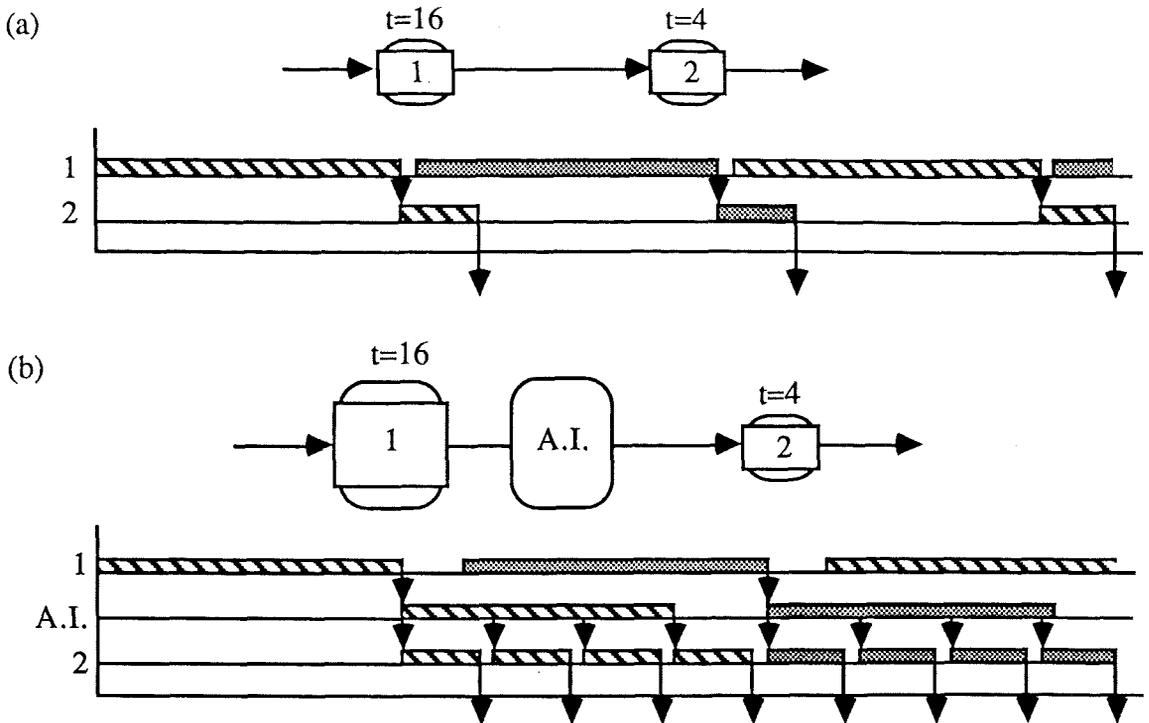


Figura 2.12. Utilización de equipos de almacenaje intermedio para desacoplar diferentes zonas de la línea de producción.

de ciclo T , debe cumplirse la siguiente relación entre tiempos de ciclo y tamaños de carga de los trenes anterior (B^u, T^u) y posterior (B^d, T^d):

$$\frac{B^u}{T^u} = \frac{B^d}{T^d} \quad (2.12)$$

2.5.5. Recursos compartidos

Finalmente, la productividad de una línea de producción puede estar restringida por factores adicionales a la disponibilidad de las propias unidades de proceso. Cuando existe limitación en los recursos disponibles compartidos, la ejecución simultánea de varias operaciones puede exigir una fuerte demanda en tales recursos. Habitualmente, además de los propios equipos de proceso, se consideran tres tipos de recursos:

- Mano de obra (de diferentes tipos y cualificaciones).
- Servicios generales: vapor, electricidad, refrigeración, etc.
- Materiales: materias de base, aditivos, catalizadores, etc.

La disponibilidad de tales recursos y los requisitos necesarios para la ejecución de cada tarea pueden interaccionar de tal forma que provoquen adelantos o retrasos en las operaciones previstas, tal y como se indicará más adelante.

2.6. Otros modelos empleados

Dada la complejidad de las transformaciones que ocurren en una planta química, en muchas ocasiones se deben utilizar modelos matemáticos sumamente complicados o basados en el conocimiento de una situación específica, a fin de predecir los resultados de unas condiciones de trabajo determinadas. Por otra parte, todo sistema de optimización debe ser capaz de predecir y evaluar rápidamente las consecuencias de diferentes conjuntos de decisiones. Por tanto, desde un punto de vista riguroso, en cada una de las alternativas planteadas por el sistema de optimización se debería realizar un cálculo detallado de dichas condiciones de trabajo para los diferentes productos³. Sin embargo, si las decisiones a tomar únicamente afectan a aspectos de estrategia productiva, sin modificar las condiciones de operación ni las recetas, la utilización de modelos aproximados permite simplificar el proceso de cálculo.

Durante la etapa de diseño preliminar, los modelos aplicables a las operaciones más utilizadas y los niveles de precisión manejados permiten aplicar las siguientes aproximaciones en el cálculo de los tiempos de operación:

- Para operaciones discontinuas, en la mayoría de los casos se puede considerar válido un modelo de cálculo de tiempo de proceso P del tipo:

$$P = a + b \cdot B^c \quad (2.13)$$

donde B es la cantidad a procesar. Las constantes a , b y c se pueden deducir de los modelos matemáticos de las diferentes operaciones realizadas, aunque en casos complejos suelen utilizarse valores basados en resultados de laboratorio o planta piloto.

- En operaciones semicontinuas suele ser suficientemente correcto el aproximar el tiempo de proceso θ utilizando un modelo lineal con el tamaño de carga en función de la capacidad del equipo utilizado:

$$\theta = \frac{B \cdot U}{R} \quad (2.14)$$

donde U es el factor de utilización de la unidad semicontinua (cantidad de producto intermedio a procesar por cada unidad de producto final), y R es su capacidad de proceso (por ejemplo, en una bomba, la cantidad que es posible bombear por unidad de tiempo).

³Por ejemplo, el tiempo y recursos necesarios para una determinada operación dependen de las cantidades procesadas, de las condiciones de operación y de las características de los equipos.

- Para el cálculo del coste de los equipos habitualmente se aceptan aproximaciones del tipo:

$$C = \alpha + \beta \cdot V^\gamma \quad (2.15)$$

donde α , β y γ son constantes.

Todas estas aproximaciones suelen presentar un rango de validez bastante amplio con un mismo conjunto de constantes, por lo que normalmente no será necesario revisar los parámetros de los modelos durante el proceso de cálculo.

Por lo que respecta al problema de planificación de la producción, estos cálculos se realizarán una sola vez en todo el proceso de optimización, ya que se conocerán las dimensiones de los equipos y las condiciones de operación. Por tanto, aunque en muchas ocasiones será necesario trabajar con mayor precisión que al resolver un problema de diseño preliminar, para obtener los valores necesarios de tiempos de proceso y coste de los recursos asociados se podrá recurrir a modelos complejos o basados en resultados experimentales sin que por ello crezcan excesivamente los recursos de cálculo necesarios para resolver el problema.