
3 Herramientas para el diseño concurrente

3.1 Modularidad y complejidad de un producto

Introducción

Hoy día crece la tendencia a concebir y diseñar los productos según una pauta modular. Podría parecer que siempre ha sido así, que los productos siempre se han compuesto de componentes y partes que luego se integran en conjuntos más complejos y, de hecho, es cierto. Sin embargo, cuando se observa la evolución de los productos a lo largo de los últimos tiempos se percibe que se ha producido un cambio de filosofía importante en este aspecto, que es consecuencia más o menos explícita de la toma en consideración del concepto de ciclo de vida de los productos y de la necesidad de las empresas de establecer una gama coherente y racional de los productos que fabrican

Conceptos

Los *productos modulares* son aquellos que están organizados según una estructura de diversos bloques constructivos, orientada a ordenar e implantar las distintas funciones y a facilitar las operaciones de composición del producto. Los bloques constructivos se llaman *módulos*, y su organización, *estructura modular*.

Se pueden distinguir dos tipos de módulos:

Módulos funcionales

Son aquellos bloques, o *módulos*, orientados fundamentalmente a materializar una o más funciones del producto y que prestan una especial atención a la interfase de conexión y a los flujos de señales, de energía y de materiales con el entorno. Los *módulos funcionales* ayudan a organizar e implantar las funciones de un producto y, por lo tanto, exigen una atención especial en la elaboración de la *estructura funcional* y un esfuerzo importante durante las etapas de definición y de diseño conceptual.

Módulos constructivos

Son aquellos bloques, o *módulos*, orientados fundamentalmente a estructurar y facilitar las operaciones de composición de un producto por medio de la partición de una secuencia de fabricación compleja en secuencias de menor complejidad y prestan una especial atención a las interfases de unión. Los *módulos constructivos* colaboran a implantar la fabricación, facilitan las tarea de planificación de la producción y disminuyen los costes. Por lo tanto, su implantación exigen una especial atención en la elaboración de la *estructura del proceso de fabricación* y un esfuerzo concurrente de los responsables de ingeniería de fabricación desde las primeras etapas del proyecto.

El concepto de producto modular adquiere todo su significado cuando la estructura modular incide en las actividades de varias etapas de su ciclo de vida, como son:

- La partición del proyecto en subproyectos en la etapa de diseño (facilita el desarrollo simultáneo de diversas partes del proyecto)
- La división de la fabricación en subgrupos y componentes (facilita las relaciones de subcontratación y la adquisición de componentes)
- Simplifica la verificación y el montaje
- Permite implantar las opciones y variantes en la comercialización
- Facilita las operaciones de mantenimiento (detección y reparación)

Por lo tanto, la estructuración *modular* de los productos es una poderosa herramienta para la perspectiva de la *ingeniería concurrente*.

Características de la estructuración modular

El diseño de productos basados en una *estructura modular* requiere un esfuerzo adicional, especialmente en las etapas de definición y de diseño conceptual, ya que la empresa deberá evaluar cuidadosamente las implicaciones que esta nueva concepción tendrá en las distintas etapas del ciclo de vida, así como en la gama de producto que ofrece (nivel de separación en módulos, partición del diseño, componentes comunes, incidencia en la fabricación y en el montaje, opciones en la comercialización y en el uso, facilidad de mantenimiento e, incluso, posibilidades de reutilización o reciclaje en el fin de vida).

Más adelante se describen conceptos y herramientas que dan apoyo a esta tarea, como el análisis de la *estructura funcional* y la caracterización de las *interfases*.

Si se hace el esfuerzo inicial de diseñar un producto basado en una *estructura modular* bien concebida, el desarrollo del resto del proyecto es más corto y económico, a la vez que se abren nuevas posibilidades y aparecen ventajas que pueden ser de gran interés a lo largo de los ciclos de vida del producto y del proyecto.

Las principales ventajas de la estructura modular para el fabricante y el usuario son:

- a) Facilita la división del proyecto y posibilita la realización del diseño de diferentes módulos en paralelo, lo que permite acortar el tiempo total de diseño
- b) Consecuentemente con el punto anterior, facilita la subcontratación de piezas y módulos y la aplicación de componentes de mercado
- c) Amplía las posibilidades de introducir nuevas funciones o variantes en el producto siempre que se mantenga la estructura modular inicial
- d) El hecho de concentrar funciones en módulos repetitivos, permite hacer un desarrollo cuidado y ensayado de estos módulos que redundará en una mayor fiabilidad
- e) Facilita el montaje, ya que implica componentes bien definidos con interfases claramente establecidas
- f) Mejora la fiabilidad del conjunto ya que se parte de módulos con funciones claramente delimitadas que se han verificado previamente
- g) Facilita la racionalización de gamas de productos al establecer módulos comunes y concentrar las opciones en módulos con variantes
- h) Una estructura de módulos constructivos en productos fabricados en pequeñas series da lugar a una solución más económica gracias a las repeticiones
- i) Los módulos comunes a diferentes miembros de una gama, también aumentan las series de fabricación y abaratan el producto
- j) En productos con un gran número de variantes, la estructuración con módulos comunes simplifica la fabricación y disminuye el tiempo de entrega.
- k) El mantenimiento es más sencillo, ya que simplifica la detección y el diagnóstico, se facilita el desmontaje y montaje y la puesta a punto es más fiable

Las principales limitaciones de la estructura modular son:

- a) En una estructura modular muy fragmentada, los inconvenientes de la subdivisión en módulos pueden ser mayores que las ventajas (dimensiones, peso, complejidad). Esta reflexión apunta a la cuestión de determinar el nivel más conveniente para descomponer un producto en módulos
- b) Mayor dificultad de adaptarse al usuario cuando los requerimientos especiales no pueden ser cubiertos por la estructura modular (pérdida de flexibilidad)
- c) Una modificación de la estructura modular, por pequeña que sea, adquiere gran complejidad por los muchos condicionantes que hay que tener en cuenta.

Caso 3.1

Estructura con módulos funcionales: proyecto SRIC

El objetivo del proyecto SRIC (*sistema de reparación interna de canalizaciones*, Figura 3.1) es inspeccionar y realizar ciertas reparaciones en canalizaciones (fundamentalmente, alcantarillas) sin tener que abrir la calle para acceder a ellas, lo que se consigue gracias a un vehículo especial alimentado y controlado a través de una conexión umbilical (potencia y señal) que se mueve por su interior.

A fin de disminuir los costes y aumentar la flexibilidad, el sistema se estructura en *módulos funcionales*: 1. *Plataforma base* (tracción y dirección, como un vehículo de orugas; base del resto de módulos); 2. *Módulo de inspección* (visión estereoscópica y medida de distancias; movimientos de cabeceo y balanceo); 3. *Módulo de mecanizado* (un motor neumático mueve una fresa para eliminar obstrucciones sólidas; movimientos de balanceo y de acercamiento); 4. *Módulo de inyección* (aplicación de resinas sellantes en uniones de tubos con pérdidas; movimiento de balanceo); 5. *Módulos laterales* (adaptación a distintos diámetros). Algunas de sus principales ventajas son:

- Costes menores en la plataforma base (y otros elementos comunes)
- Flexibilidad en la comercialización
- Facilidad en el desarrollo de nuevos módulos con nuevas funciones

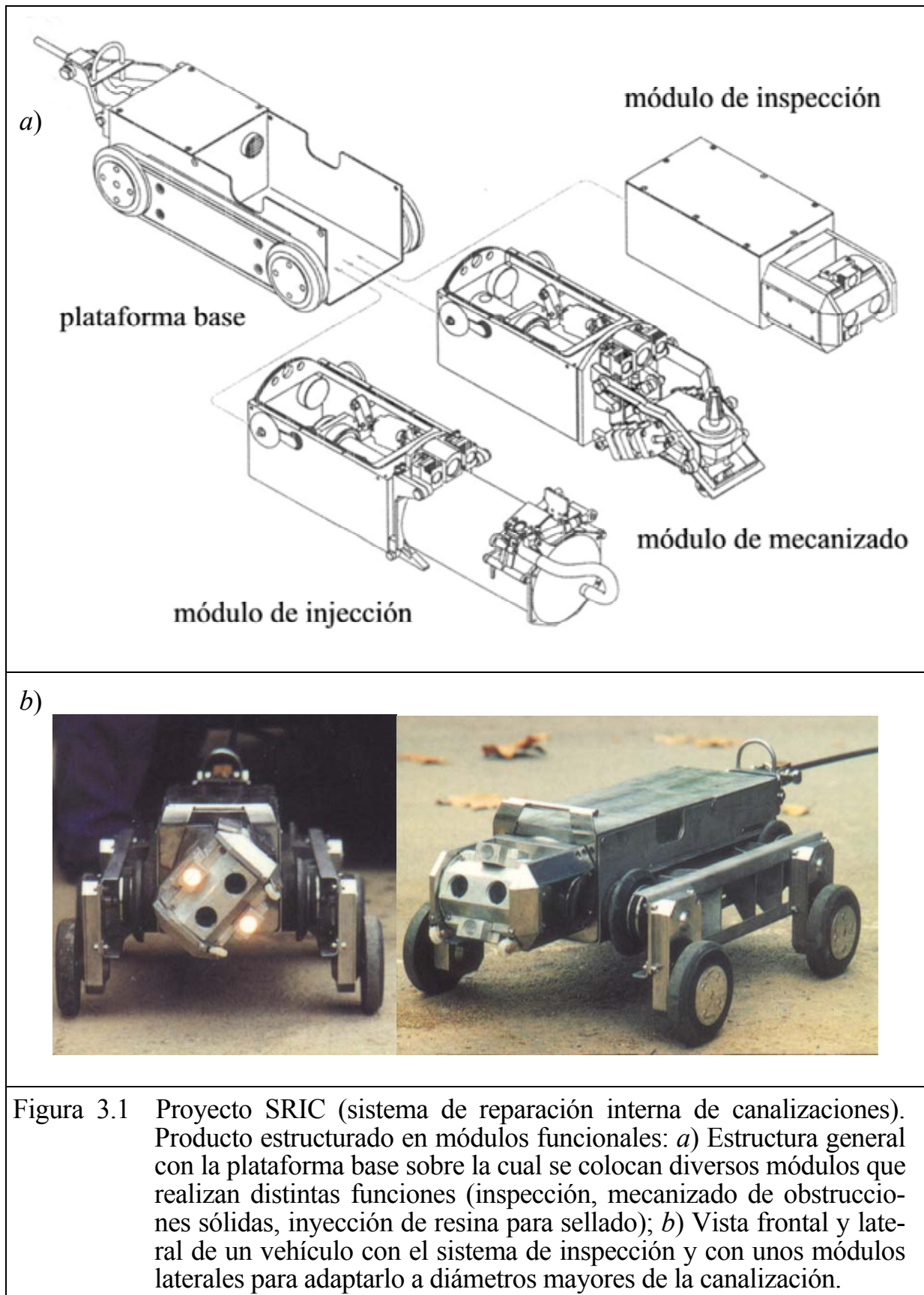
Caso 3.2

Estructura con módulos constructivos: túnel de lavado

Un túnel de lavado es una máquina de elevada productividad formada por un tubo de gran diámetro (unos 2 metros) con compartimentos en su interior que por medio de distintos artilugios (tornillo de Arquímedes, pala de transferencia) hace avanzar la ropa a intervalos especificados. La longitud total se relaciona con la productividad, ya que cuántos más compartimentos tenga, los intervalos de transferencia serán menores. Cada compartimento puede realizar diversas funciones (prelavado, lavado con agua fría o caliente, aclarado) en función de las entradas y salidas de agua y de productos y de la temperatura del baño.

El principal inconveniente de los túneles convencionales es construir el cuerpo unitario del túnel (excesivas uniones soldadas, a menudo difíciles y peligrosas por ser interiores, falta de precisión del conjunto, existencia de tantas versiones como longitudes). La idea directriz del nuevo túnel de Girbau S.A. (Figura 3.2; dispone de patente) consiste en formar el cuerpo del túnel a partir de módulos iguales (semejantes a bombos de lavadora) ensartados por unas barras longitudinales postensadas, de forma análoga a determinadas vigas para la construcción de puentes.

Después de superar numerosas dificultades técnicas (unión torsional entre módulos, realización del postensado, apoyo y accionamiento por los extremos, construcción de la envolvente y las juntas) el resultado ha sido un túnel mucho más fácil de fabricar, de coste mucho menor que los de la competencia y con una gran flexibilidad para adaptarlo a las necesidades de los clientes.



Estructura funcional

Función global y subfunciones

Con el propósito de describir y resolver los problemas de diseño, es útil aplicar el concepto de función, que es cualquier transformación (en el sentido de realización de una tarea) entre unos flujos de entrada y de salida, tanto si se trata de funciones estáticas (invariables en el tiempo) como de funciones dinámicas (que cambian con el tiempo). La función es, pues, una formulación abstracta de una tarea, independientemente de la solución particular que la materializa.

La *función global* representa la tarea global que debe realizar el producto que se va a diseñar y se establece como una caja negra que relaciona los flujos de entrada y los de salida. Sin embargo, esta presentación es muy esquemática y, para obtener una representación más precisa, hay que dividir la función global en subfunciones (correspondientes a subtareas) y a la vez, establecer las relaciones de flujos entre estas subfunciones.

La representación del conjunto de subfunciones con las entradas y salidas así como las interrelaciones de flujos entre ellas se denomina *estructura funcional*.

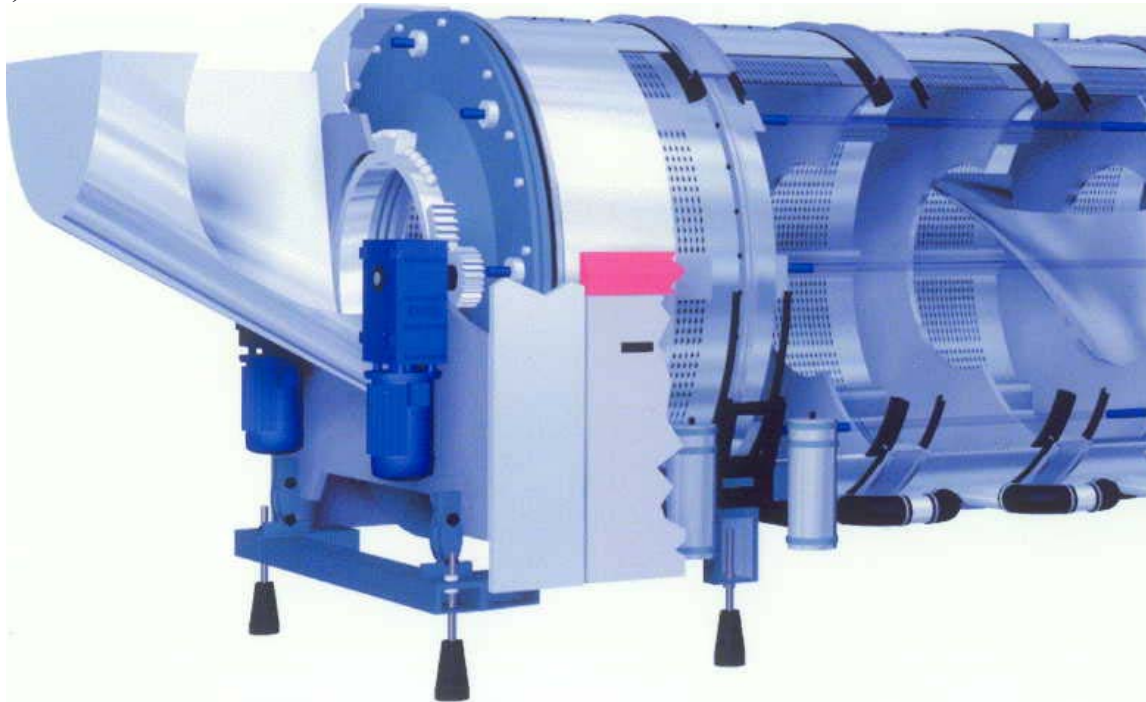
Modos de operación

La tesis doctoral de Joan Cabarrocas [Cab, 1999] introduce el concepto de *modo de operación* que se define como cada uno de los comportamientos (o maneras de funcionar) que puede desarrollar un producto o sistema durante su ciclo de vida. Y aún añade una clasificación de estos modos de operación en:

- *Modos de operación principales*. Son aquellos que se derivan de la realización de la función principal en condiciones normales de funcionamiento
- *Modos de operación ocasionales*. Son aquellos que deben darse de manera puntual para la correcta realización de los modos de funcionamiento principales (puesta en marcha y paro, períodos de inactividad, limpieza y recarga, mantenimiento y reparación, programación y ajuste)
- *Modos de operación accidentales*. Son aquellos que se producen de manera fortuita y no deseada con posibles daños para el sistema y el entorno (bloqueos y retenciones, conexión y desconexión involuntaria, caídas y golpes, situaciones ambientales extremas).

Para un producto o sistema que presenta diversos modos de operación, deben de desarrollarse tantas *estructuras funcionales* como modos de operación tenga, a pesar de que algunas de ellas pueden ser triviales.

a)



b)



Figura 3.2 Túnel de lavado de Girbau S.A. (producto estructurado en módulos constructivos): a) Imagen seccionada donde se ve la estructura modular y los sistemas de apoyo y accionamiento; b) Planta de fabricación de túneles de Girbau S.A.

Módulos e interfases

El análisis funcional de un producto o sistema y la elaboración de la estructura *funcional* es un primer paso para establecer su *estructura modular* (la mayor parte de diseñadores realizan estos procesos sin formalizarlos), a partir de combinar las diversas funciones en módulos de forma que se consigan los dos objetivos prioritarios siguientes:

a) *Agrupar las funciones en módulos*

Es conveniente que cada una de las funciones sea realizada por un solo módulo. En caso de no ser posible, hay que delimitar convenientemente la parte de la función que realiza cada módulo y sus interrelaciones (ver en el párrafo siguiente las consideraciones sobre las *interfases*). El establecer una estructura modular subdividida en mayor o menor grado es uno de los criterios que hay que analizar cuidadosamente, lo que se trata en la última sección.

b) *Establecer interfases adecuadas entre módulos*

Interfase es cualquier superficie real o imaginaria entre dos módulos de un sistema, a través de la cual se establece alguna de las siguientes relaciones: unión mecánica, flujo de energía, flujo de materiales o flujo de señales.

b1) *Interfase mecánica*

Superficie por medio de la cual se establece una *unión* mecánica entre dos módulos de un producto o sistema. Esta unión puede ser *fija*, si no permite el movimiento relativo entre las partes, o *móvil* (también *enlace*), si lo permite (función de una determinada geometría de contacto).

b2) *Interfase de energía*

Superficie a través de la cual se establece un flujo de energía entre módulos de un producto o sistema (en casos límites, también de fuerzas, deformaciones o movimientos). Las interfases de energía más frecuentes son las de alimentación eléctrica, de aire comprimido y de fluido hidráulico.

b3) *Interfase de transferencia de materiales*

Superficie a través de la cual se establece un flujo de material entre módulos de un producto o sistema. Por ejemplo, la alimentación de materia prima y la retirada de piezas acabadas en un torno.

b4) *Interfase de señal*

Superficie a través de la cual se establece un flujo de señal entre módulos de un producto o sistema. Por ejemplo, la comunicación de la imagen entre la unidad central y la pantalla de un ordenador.

Lamentablemente, a menudo se parte en los diseños de un análisis limitado a las interfases mecánicas e insuficiente por lo que respecta a otros flujos. Ello puede acarrear que los "detalles" de última hora (cableados, conducciones, alimentación de materiales), se transformen en problemas de muy difícil solución en una etapa del proyecto en la que las principales decisiones ya han sido tomadas.

Simbología

Para facilitar la representación de las funciones y de los flujos en la *estructura funcional* de un producto o sistema, es conveniente disponer de símbolos adecuados cuya utilización sea lo suficientemente flexible.

En este texto se ha adoptado fundamentalmente la simbología propuesta por la norma VDI 2222 que tiene la virtud de que, sin limitar las funciones a las estrictamente matemáticas o lógicas, y sin obligar a precisar ni a cuantificar las variables de los flujos, permite establecer una *estructura funcional* suficientemente articulada que sirva de guía para fijar la estructura *modular* del producto o sistema y para generar los *principios de solución* (ver la Sección 2.5 sobre *diseño conceptual*).

Los *símbolos* utilizados son los siguientes:

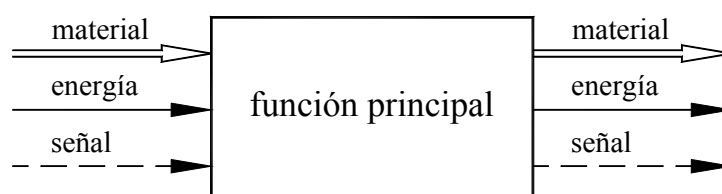
Función:	Rectángulo de línea continua
Flujo de material y dirección:	Flecha de doble línea continua
Flujo de energía y dirección:	Flecha de línea continua
Flujo de señal y dirección:	Flecha de línea discontinua
Sistema, subsistema, módulo:	Polígono de línea de punto y raya

Las *descripciones* de los diferentes conceptos se realizan de la siguiente manera:

Funciones. Se sitúan dentro del rectángulo y preferentemente se definen con un verbo seguido de un predicado: transferir pieza; mover brazo; controlar posición.

Flujos. Su objeto se indica encima de las flechas correspondientes: de pieza en bruto, acabada; de alimentación eléctrica, de accionamiento del cabezal; de señal de puesta en marcha, de posición.

Sistema, subsistemas y módulos. Se indica encima y a mano izquierda del polígono que los delimita.



Caso 3.3

Estructura funcional para el diseño de un contenedor soterrado

La escasez de espacio en muchas de las ciudades ha hecho que se propongan sistemas de contenedores que normalmente están soterrados y cubiertos con una tapa solidaria a un buzón para la entrada de bolsas de basura. En el momento de la recogida, se separa la tapa y se eleva el contenedor hasta el nivel del suelo; después de la recogida, se baja de nuevo el contenedor y se coloca la tapa.

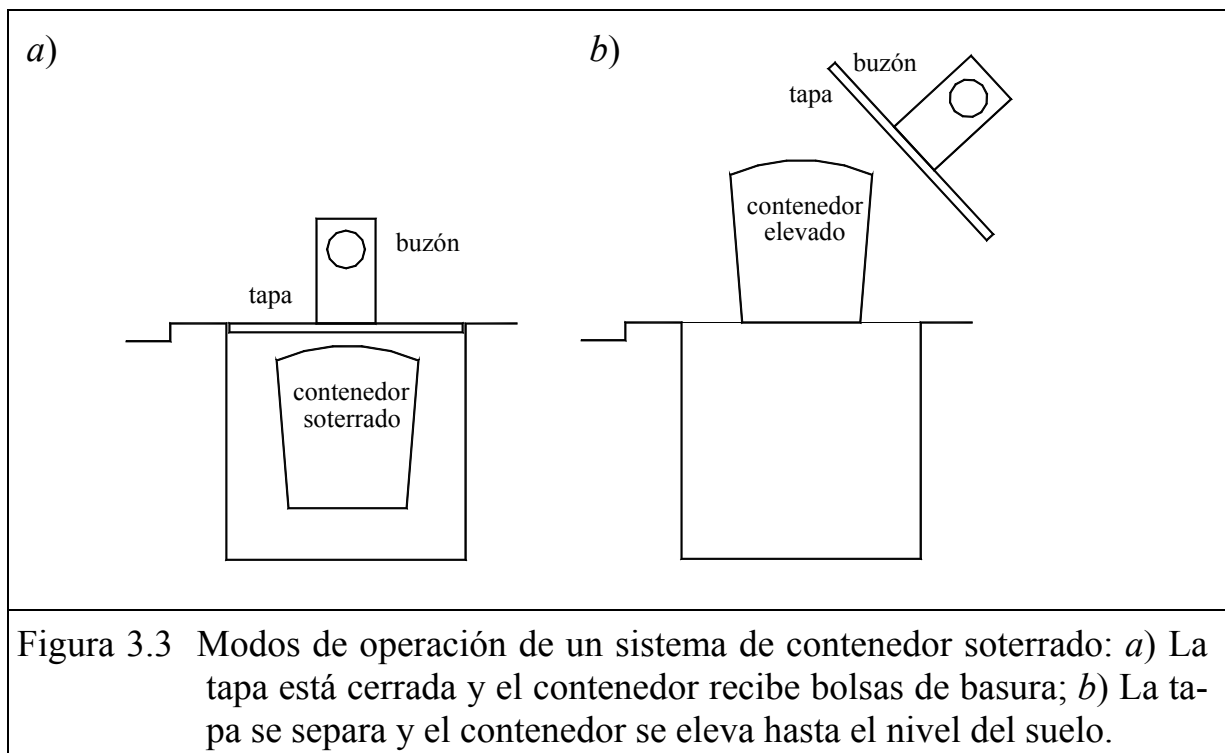


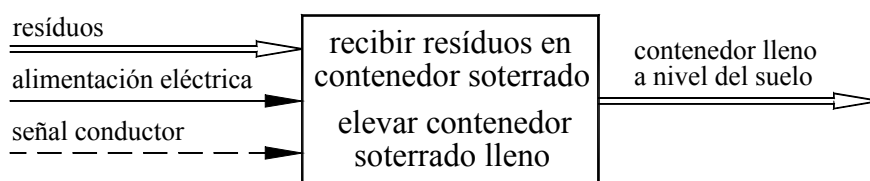
Figura 3.3 Modos de operación de un sistema de contenedor soterrado: a) La tapa está cerrada y el contenedor recibe bolsas de basura; b) La tapa se separa y el contenedor se eleva hasta el nivel del suelo.

Algunas de las principales funciones del sistema son (ver la Figura 3.2):

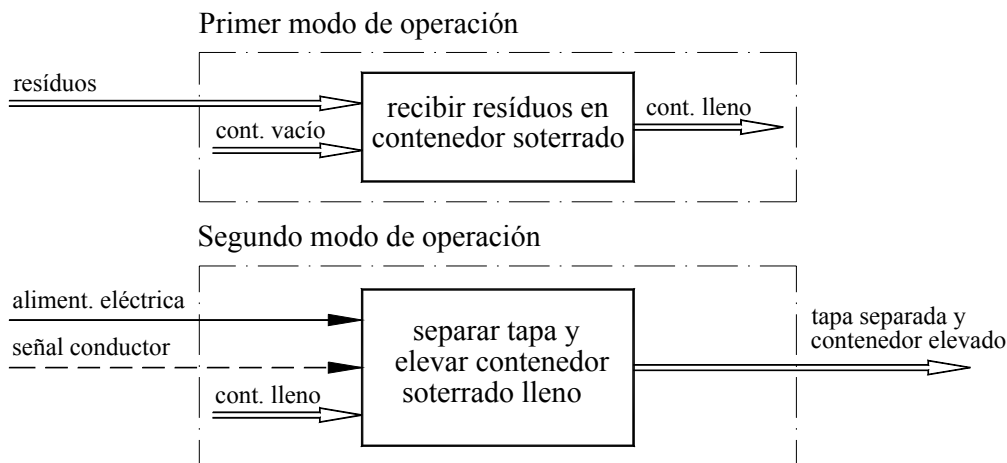
- Recibir bolsas de basura a través del buzón
- Ajustar la tapa para evitar malos olores
- Separar la tapa con el buzón
- Elevar el contenedor lleno hasta el nivel del suelo

Función global y estructura funcional

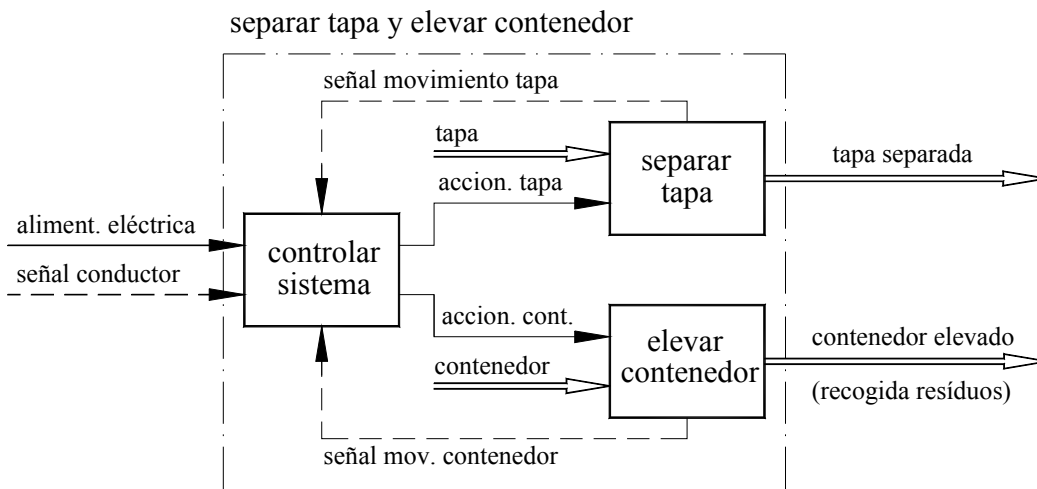
La función global de este sistema puede representarse de la siguiente manera:



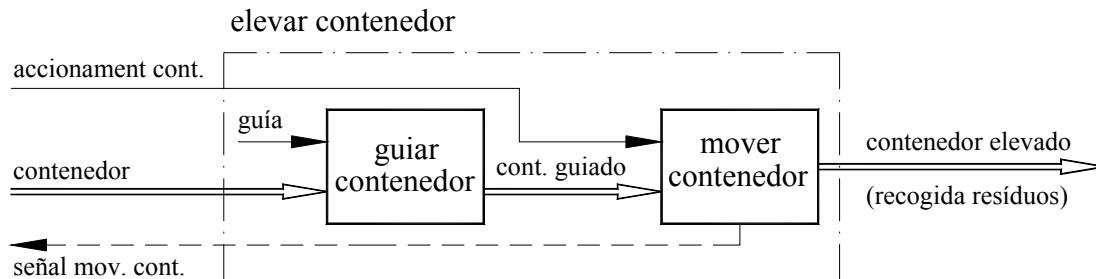
Al avanzar en el establecimiento de la estructura funcional, inmediatamente se constata de que el sistema tiene dos modos de operación principales: 1) La recepción de la basura; 2) La elevación del contenedor lleno para poder efectuar la recogida. La nueva representación tiene la siguiente forma:



El primer modo de operación es relativamente sencillo y no se analiza aquí. Sin embargo, el análisis del segundo modo de operación presenta más complejidad y también mucho más interés. En efecto, hay que ejecutar dos subfunciones diferentes en un cierto orden (o al menos de forma coordinada): *a)* Separar la tapa; *b)* Elevar el contenedor lleno. Para coordinar estas acciones, debe preverse una función de control. Después de vaciar el contenedor, hay que realizar las operaciones inversas, bajar el contenedor vacío y colocar (y ajustar) la tapa. La nueva representación de la estructura funcional (sin la bajada del contenedor ni la colocación de la tapa), podría ser:



Finalmente (en este ejemplo), las dos funciones de *separar tapa* y *elevador lleno* se pueden subdividir en las subfunciones técnicas de *guiar* y *mover*. La parte de la estructura funcional de la acción de elevar el contenedor lleno, es:



Principios de solución

A partir del análisis de la estructura funcional y de los condicionantes de diseño, se establecen los principios de solución siguientes:

- A) El primero consiste en unir en un solo conjunto la tapa y el soporte del contenedor, que se guía por medio de unos rodillos que se mueven en un perfil (solución análoga a la de una carretilla elevadora) por un cilindro hidráulico que acciona el conjunto por la parte superior (Figura 3.4a).
- B) Y, el segundo, consiste en articular la tapa a nivel del suelo mientras que el soporte del contenedor se guía de forma análoga al caso anterior. Sin embargo, en esta solución se requieren cilindros hidráulicos para cada uno de los dos movimientos y un dispositivo de control para coordinarlos (Figura 3.4b).

Evaluación de los principios de solución

Desde el punto de vista de simplicidad constructiva y de funcionamiento, el principio de solución *A* es muy superior (buen ajuste de la tapa; intrusión mínima de la tapa en el entorno; un solo guiado y un solo cilindro; sistema de control mínimo), siempre que el contenedor pueda ser retirado horizontalmente (habitualmente a mano).

Sin embargo, este sistema no es apto para la recogida monooperada con unidades de carga lateral, ya que el contenedor requiere un movimiento fundamentalmente de elevación. En cambio, el principio de solución *B* que es apto para ello, además de su mayor complejidad, presenta otros inconvenientes que deben resolverse satisfactoriamente como son la posibilidad de tropezones con la bisagra, la intrusión del buzón sobre la acera o el ajuste más deficiente de la tapa.

En este caso se observa que el diseño de contenedor soterrado no puede desligarse de la solución adoptada en el sistema de recogida de basura.

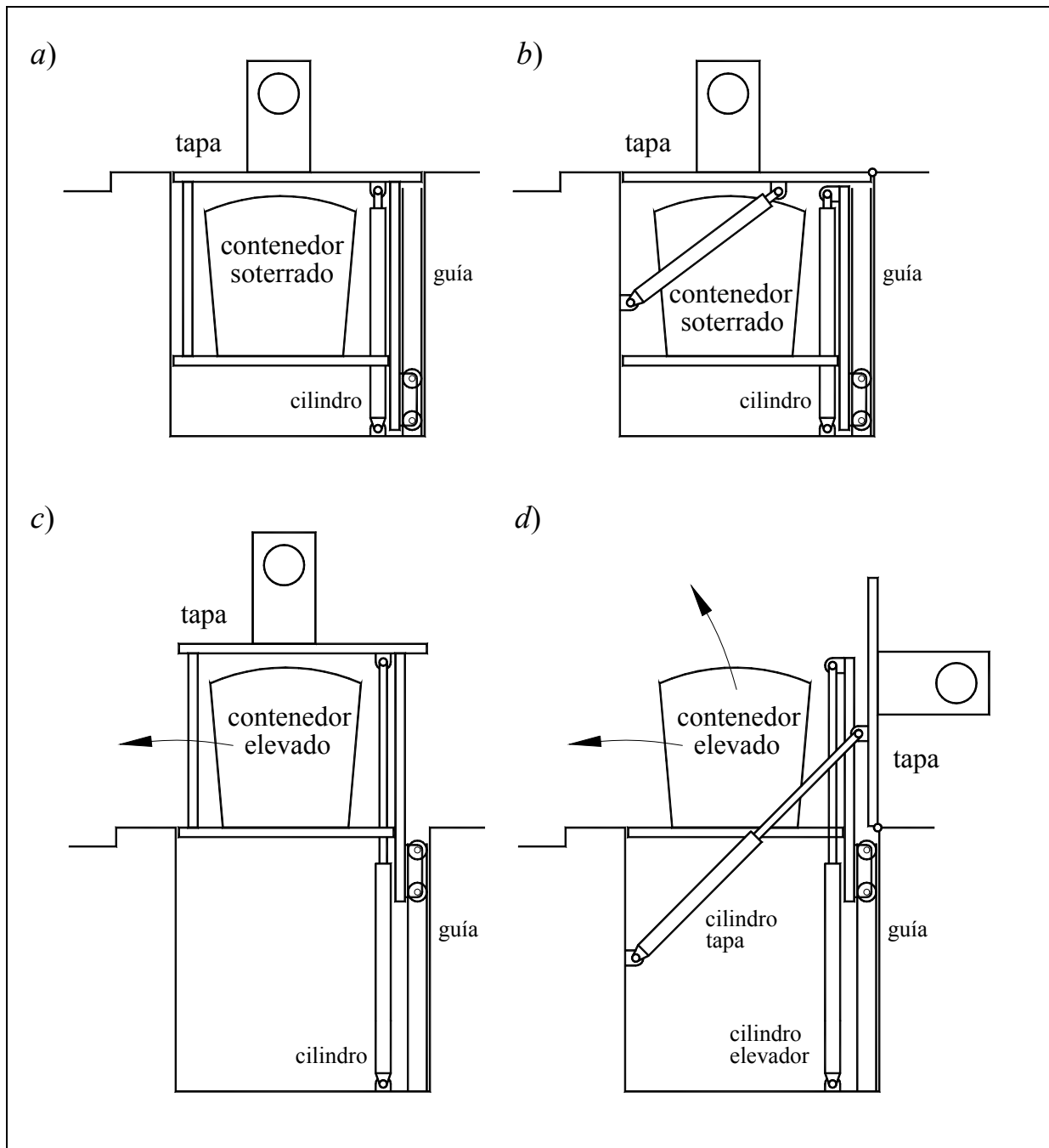


Figura 3.4 Dos principios de solución: *a)* Tapa y soporte del contenedor forman un conjunto guiado por rodillos que se acciona por un solo cilindro. El contenedor no puede retirarse verticalmente; (el apartado *c* muestra el conjunto en posición elevada); *b)* Tapa articulada al suelo y soporte del contenedor guiado por rodillos; requiere cilindros independientes y un sistema de control para coordinar los movimientos). El contenedor puede retirarse verticalmente; (el apartado *d*, muestra el sistema en la posición elevada).

Estructura funcional y estructura modular

La estructura funcional constituye una ayuda importante para establecer la estructura modular de un producto o sistema. El despliegue de las diferentes funciones (tanto las que provienen de la especificación como las originadas por requerimientos técnicos) y de los flujos que las interconectan componen el marco de referencia a la que cualquier solución de la estructura modular debe satisfacer.

A pesar de su gran incidencia en la práctica industrial, los criterios para elaborar la estructura modular han sido poco estudiados (hay escasos trabajos escritos sobre el tema) y, sin embargo, sorprende la buena intuición sobre el tema de muchos de los responsables industriales al establecer los módulos y las gamas de productos.

Seguidamente se analiza la relación entre funciones y módulos en el proyecto SRIC (continuación del Caso 3.1) desarrollado en la Universitat Politècnica de Catalunya.

Caso 3.1 (inicio en la página 124)

Estructura con módulos funcionales: proyecto SRIC

Las funciones básicas que contempla la estructura funcional del proyecto SRIC (*sistema de reparación interna de canalizaciones*; ver Figura 3.1) son las siguientes: *a*) Desplazar el conjunto por el interior de la canalización; *b*) Medir la inclinación de la canalización; *c*) Orientar (cámara, herramienta de mecanizado, cabezal de inyección); *d1*) Inspeccionar con dos cámaras de vídeo (base para la medida de distancias); *d2*) Inspeccionar con una cámara (operaciones de mecanizado y de inyección); *e*) Iluminar la canalización; *f*) Mecanizar (para eliminar obstáculos sólidos); *g*) Inyectar sellante (hacer estancas las juntas de la canalización con pérdidas); *h*) Suministrar el sellante; *i*) Comunicar con el exterior (señales, energía, materiales).

La estructuración modular del sistema puede basarse, entre otras, en las tres soluciones siguientes: 1. Diseñar un solo vehículo que incorpore todas las funciones anteriores (funciones *a, b, c, d1* o *d2, e, f, g, h, i*); 2. Concebir tres vehículos que realicen las tres funciones finales: vehículo de inspección (funciones *a, b, c, d1, e, i*); vehículo de mecanización (funciones *a, b, d2, e, f, i*); y vehículo de inyección de sellante (funciones *a, b, d2, e, g, h, i*); 3. Establecer un sistema modular con una *plataforma base* (funciones *a, b, i*) y tres módulos distintos que se le acoplan: *módulo de inspección* (funciones *c, d1, e*); *módulo de mecanizado* (funciones *c, d2, e, f*); y *módulo de inyección* (funciones *c, d2, e, g, h*).

La primera solución es prácticamente inabordable, ya que el diámetro mínimo por donde se debe mover el sistema es de 300 mm, la segunda obliga a duplicar muchas funciones en los distintos vehículos mientras que, la tercera, representa un buen compromiso en el reparto de funciones que además, facilita el despliegue de nuevos módulos con nuevas funciones.

Complejidad

De forma general, la complejidad está relacionada con el número y las relaciones entre los elementos que intervienen en la determinación de una pieza, componente, producto o sistema. Dado que en este tema hay un gran número de puntos de vista y de criterios distintos, nos parece útil adoptar las siguientes definiciones:

a) *Complejidad de piezas y componentes* (o complejidad de fabricación)

Una pieza es tanto más compleja como más intrincada es su forma y más difícil su conformación.

En la evaluación de la complejidad de piezas y componentes intervienen aspectos como el tipo de operación de conformado, el número de cotas distintas que definen la pieza o componente, y el grado de precisión (se mide por medio de una determinada relación entre las dimensiones y sus campos de tolerancia).

b) *Complejidad de un conjunto* (o complejidad de composición y montaje)

Un conjunto es tanto más complejo cuanto mayor es el número de piezas y componentes, mayor es la diversidad de piezas y componentes, y mayor es el número de interfases entre piezas y componentes.

La disminución de la complejidad de un producto o sistema tiene en general efectos beneficiosos desde muchos puntos de vista, por lo que es un objetivo a perseguir en las tareas de diseño:

- Disminución del número de piezas a fabricar
- Disminución del número de interfases (deterioros y desgastes en los enlaces, asentamientos entre superficies, conexiones y flujos)
- Disminución del número de elementos de unión y de enlace (tornillos, remaches, soldaduras, rodamientos, guías, conectores, conducciones)
- Disminución del coste (menos piezas que, sin embargo, pueden ser más complejas); menos operaciones de montaje
- Mayor fiabilidad del conjunto (menos elementos susceptibles de mal funcionamiento) y mejora de la mantenibilidad.

Evaluación de la complejidad

En general, los métodos para evaluar la complejidad parten de la consideración de que la complejidad está correlacionada con las discontinuidades que se presentan en la fabricación de las piezas y componentes (diferentes estacadas de la pieza, operaciones, superficies, chaflanes, radios de enlace, roscas) y en la composición de conjuntos (número y variedad de piezas, interfases).

Factor de complejidad de piezas y componentes

Los métodos propuestos son relativamente laboriosos y su principal utilidad está en la etapa de diseño de detalle para evaluar alternativas constructivas de piezas o componentes. Por su menor eficacia (se aplica a un nivel de definición en el que no es difícil evaluar directamente el coste) y por ser un tema relativamente alejado del objetivo de este texto, estos métodos no se detallan.

Factor de complejidad de un conjunto, C_f

A continuación se expone un método sencillo y eficaz para evaluar la complejidad de un conjunto o sistema por medio del *factor de complejidad*, C_f , propuesto por Pugh [Pug, 1991] el cual, partiendo de los siguientes parámetros:

- N_p = Número de piezas o componentes del conjunto considerado
- N_t = Número de tipos distintos de piezas o componentes
- N_i = Número de interfases, enlaces o conexiones del conjunto
- f = Número de funciones que realiza el conjunto

establece la siguiente expresión (K es un factor de conveniencia):

$$C_f = \frac{K}{f} \cdot \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i}$$

Dado que este método suele aplicarse a propuestas alternativas que dan solución a un mismo problema, el número de funciones es el mismo, por lo que puede suprimirse el parámetro f . El nuevo *factor de complejidad* simplificado es:

$$C_f = \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i} \quad \text{o} \quad C_f = N_p \cdot N_t \cdot N_i$$

Caso 3.4 (se basa en el Caso 3.3)

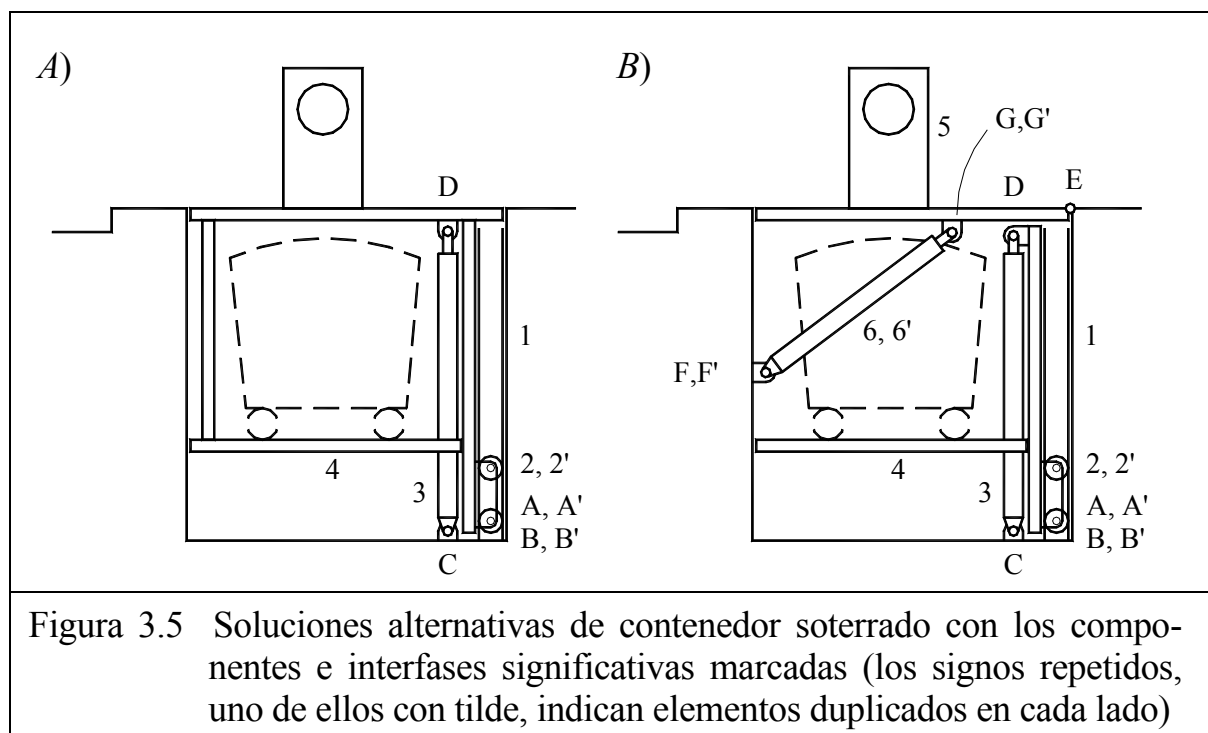
Evaluación de la complejidad de dos alternativas de contenedor soterrado

Se trata de evaluar la complejidad de las dos alternativas conceptuales del sistema de contenedor soterrado establecidas en el caso anterior. Se han reproducido los esquemas (ver Figura 3.5), ahora con las indicaciones de los diferentes componentes (números) y de las distintas interfases o conexiones (letras).

Las siguientes simplificaciones y consideraciones hacen el método operativo:

- 1 Se ha considerado cada cilindro o cada conjunto de guiado como un componente ya que intervienen como tales (a pesar de ser conjuntos en si mismos)
2. También se ha considerado que la relación de cada conjunto de guiado con las guías o con el soporte de contenedor forman una sola interfase o enlace.

3. Por necesidades constructivas hay algunos elementos duplicados (conjuntos de guiado, que también guían en sentido transversal; cilindros de la tapa)



Aplicando el criterio de Pugh en la alternativa presentada, se obtiene:

		alternativa A	alternativa B
Número de componentes	N_p	5	8
Número de componentes diferentes	N_t	4	6
Número de interfaces	N_i	6	11
Factor de complejidad	$C_f = N_p \cdot N_t \cdot N_i$	120	528
	$C_f^{1/3}$	4,93	8,08

Comentarios

En primer lugar, hay que hacer notar que el resultado se aproxima bastante bien a la percepción del diseñador (sobre todo el dado por la raíz cúbica). Si se evalúa por medio del simple producto de los parámetros, el factor de complejidad de la alternativa B tiene un valor casi 5 veces superior a la alternativa A mientras que, si se extrae la raíz cúbica, la relación de factores de complejidad se reduce a casi 2.

Y, en segundo lugar, este método permitiría evaluar la incidencia de cualquier modificación del diseño en la complejidad.

Modularidad y complejidad

En general, la modularidad aporta más beneficios que inconvenientes, pero nos podemos preguntar: ¿hasta que punto conviene subdividir un producto o sistema?

Es difícil dar criterios generales sobre esta cuestión que es de vital importancia práctica. Sin perder de vista las características del producto o sistema sobre el que se trabaja se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- a) Procurar que la estructura modular haga transparente el funcionamiento del producto o sistema al usuario
- b) No subdividir en exceso, ya que aparecen problemas debidos al elevado número de interfases y en la necesidad de duplicar determinados elementos en cada módulo (es el caso de los reductores por etapas que se analizan más adelante)
- c) No hacer una división escasa, ya que los módulos pueden transformarse en excesivamente complejos y perderse las ventajas de la modularidad.
- d) Eliminar variabilidades en elementos que no la necesiten por su funcionalidad (es el caso del eje hueco de salida en reductores de engranajes que permite aplicar un único reductor a distintos requerimientos del eje de salida)
- e) Complementariamente a lo anterior, tender a acumular opciones y variantes en determinados módulos a fin de simplificar las gamas de productos.

Caso 3.5

Modularización de reductores de engranajes

Un fabricante puede pensar que una buena solución para su gama de reductores es establecer un módulo para cada etapa. De esta manera se obtendrían los distintos reductores por composición de módulos según las necesidades de cada cliente (Figura 3.6a; en algunos reductores planetarios o cicloidales se hace así).

Cuando se analiza el tema más a fondo, se constata que la dimensión global del reductor viene determinada por la última etapa y el par de salida, siendo las dimensiones de las etapas anteriores mucho menores ya que los pares van disminuyendo. Por lo tanto, la formación de un reductor a partir de módulos por etapa aumenta la complejidad del sistema (requiere más ejes y rodamientos) a la vez que da lugar a una composición más voluminosa e irregular.

La estrategia que han adoptado la mayoría de fabricantes de reductores es distinta: se diseña una carcasa ligeramente mayor que la que requiere la última etapa y se prevé el lugar para hasta 4 ejes (ver Figura 3.6b; en determinadas aplicaciones se utilizan solo 2 ó 3 ejes).

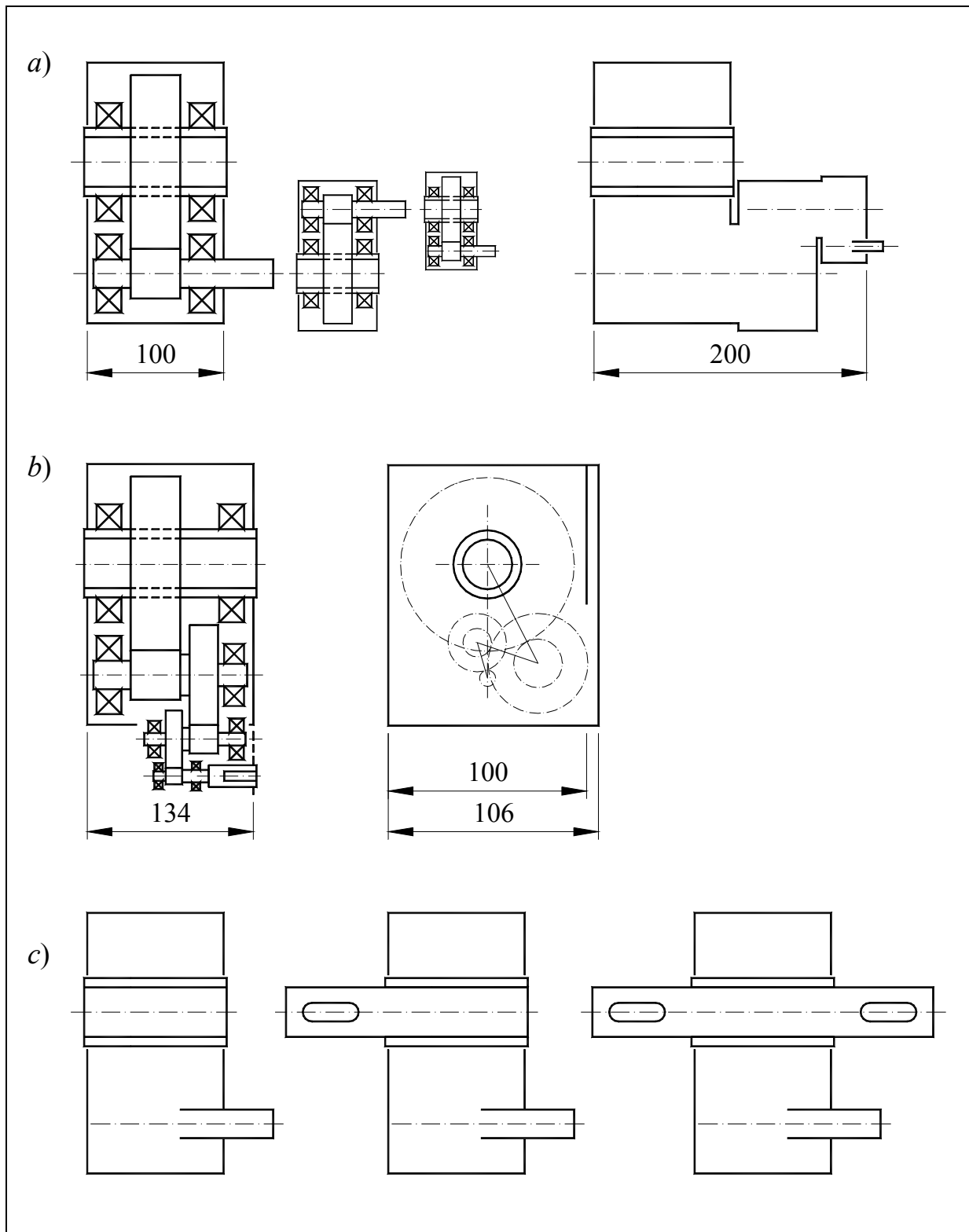


Figura 3.6 Diferentes propuestas de modularización de reductores: *a)* Módulos por etapas y composición de tres módulos; *b)* Reductor integral de tres etapas; *c)* Reductor con eje hueco y aplicaciones.

3.2 Diseño para la fabricación (DFM)

Introducción

El *Diseño para la fabricación* (DFM, *design for manufacturing*) es el primer paso en el camino hacia la *ingeniería concurrente*: además de la función, se diseña también para que el producto sea fácil y económico de producir.

Fabricar tiene un significado amplio: significa partir de materias primas, productos semielaborados y componentes de mercado y construir un producto o una máquina lo que engloba, como mínimo, los dos tipos de actividades siguientes:

a) *Conformación de piezas*

Consiste en dar forma a las piezas y a los componentes básicos de un producto por medio de una gran diversidad de procesos (fundición, forja, laminación, deformación, sinterizado, mecanizado, extrusión, inyección, tratamientos térmicos, recubrimientos) y también realizar primeras composiciones y uniones permanentes (calar ejes, rebordonar, soldar por puntos, al arco, por ultrasonidos, encolar) para formar componentes básicos.

b) *Montaje del producto*

Consiste en componer el producto a partir de las piezas y componentes elementales y comprende operaciones de inserción, de referenciación, de unión (fundamentalmente desmontables), pero también operaciones de puesta a punto y ajuste, de llenado de fluidos, de inicialización y, por último, de comprobación del correcto funcionamiento del conjunto.

En correspondencia con estos dos grandes tipos de actividades se han desarrollado métodos de ingeniería concurrente que son:

Diseño para la conformación

No hay unas siglas específicas y generalizadas en inglés. Pugh [Pug, 1991] lo describe como DFPP (*design for piecepart productivity*), que podría tener como equivalencia diseño para la productividad de piezas y componentes. Sin embargo, otros asignan el concepto de DFM (*design for manufacturing*) a este aspecto concreto de la fabricación.

Diseño para el montaje

Se designa por DFA (*design for assembly*, en inglés) y cuenta ya desde 1987 con el trabajo *Product design for assembly* de G.Boothroyd y P.Dewhurst, obra ya de una gran madurez que se puede obtener tanto en forma de manual como de programa de ordenador.

Cada vez es más frecuente la consideración conjunta de estas dos vertientes de la fabricación, lo que se designa por DFMA (en inglés, *design for manufacturing and assembly*). Este es un planteamiento sensato ya que, a menudo, la simplificación del montaje conlleva la fabricación de piezas más complejas o viceversa, por lo que hay que establecer compromisos entre estos dos aspectos.

Sin embargo, a efectos expositivos, en este texto se ha preferido presentar las dos metodologías en secciones separadas, reservando el ejercicio de su integración en las aplicaciones prácticas.

El resto de esta Sección (3.2) trata el *diseño para la fabricación* (DFM, en el sentido de conformación), el cual presenta una gran número de situaciones distintas debido a la gran diversidad de los procesos de fabricación y para los cuales se dan ciertas recomendaciones, muchas de ellas bien conocidas. Quizás la metodología más interesante en este apartado es la *tecnología de grupos* (TG; *group technology*, en inglés), iniciada hace más de 30 años y que a pesar de aplicarse poco como tal, ha influido en formulaciones y metodologías de la ingeniería concurrente.

La siguiente Sección (3.3) trata del *diseño para el montaje* que a nuestro entender, ofrece mayores potencialidades en la perspectiva de la ingeniería concurrente.

Procedimientos automatizados de manipulación y fijación

Como ya se dijo en la introducción de este texto (Sección 1.1) uno de los elementos principales que ha impulsado la ingeniería concurrente ha sido la dificultad de automatizar la fabricación de productos y sistemas que no han sido concebidos para este fin. Y, una de las principales dificultades de la fabricación automatizada es la manipulación de las piezas y componentes.

El hecho de ser tan habitual nos hace olvidar que la flexibilidad de nuestras manos, ayudadas por los sistemas de percepción (vista, oído y tacto) y controladas por el potente cerebro humano, son uno de los sistemas más perfectos para la manipulación de piezas y objetos. Piénsese sino en algunos ejemplos:

- La dificultad que tendría un sistema robótico para el simple acto de atender una llamada telefónica (sujetar, descolgar y orientar correctamente el auricular hasta la oreja y la boca que están en continuo movimiento). Inmediatamente se percibe que este no es el camino a seguir, como bien demuestran los contestadores automáticos.
- O, la dificultad de un robot doméstico para poner el azúcar y remover una taza de café, sin verterlo, sin romperla. ¿Y la complejidad de elaborar el criterio para determinar si es demasiado dulce o amargo ?

La robótica nos ha hecho ver la gran perfección y complejidad de estas simples acciones humanas. Los sistemas automatizados están aún lejos de tener estas capacidades y, cuando existen, su aplicación suele ser aún demasiado lenta y costosa. En la automatización, el mimetismo puede ser un error. Las máquinas son menos flexibles que el hombre pero también más potentes, precisas y robustas, por lo que hay que aprovechar precisamente estas cualidades.

Las investigaciones sobre nuevas tecnologías de fabricación están avanzando en dos direcciones opuestas: por un lado, se trabaja para aproximar los medios de prensión y la percepción e inteligencia artificial a las capacidades humanas; y por otro lado, se están desarrollando nuevas concepciones y metodologías en las que se minimice las necesidades de estas capacidades (componentes con simetrías, ordenación de las piezas, paletización, cadenas de montaje integradas).

Ordenación de las piezas

Dadas las limitaciones de los actuales sistemas automatizados en relación a las capacidades humanas, uno de los principales objetivos de la manipulación y fijación de las piezas en los procesos de fabricación, tanto en la conformación como en el montaje, es mantener el orden de las piezas, o sea, su posición y orientación.

Si se pierde el orden, recuperarlo es caro. Para piezas pequeñas fabricadas en grandes series se suelen usar dispositivos vibradores (cubos, mesas) con trampas mecánicas para eliminar las orientaciones no deseadas, no sin un coste importante en útiles (ver Figura 3.7a y b). En otras aplicaciones con piezas más complejas o de mayor tamaño se usan sistemas robóticos dotados de percepción artificial (normalmente visión), de coste generalmente más elevado. Finalmente, las piezas de gran tamaño se suelen manipular manualmente con la ayuda de útiles.

Los principales sistemas para evitar la pérdida del orden en los procesos de conformación y montaje son (Figura 3.7):

- a) *Fabricación en cadena*, ya que existe un flujo continuo de piezas que mantienen la referencia en las distintas fases del proceso
- b) *Células de fabricación*, propugnadas por la *tecnología de grupos*, ya que se suele disponer de un robot de alimentación que mantiene las referencias
- c) *Paletización* (ordenación de las piezas en cajas especiales), lo que permite conformar y montar series medianas y grandes de piezas en procesos discontinuos sin que se pierdan las referencias, pero obliga a invertir en palets a medida
- d) *Sistemas de alimentación*. Dispositivos capaces de alimentar ordenadamente materiales (barras en un torno de decoletaje) o piezas (tornillos o remaches, en procesos automáticos de unión). Generalmente se realizan a medida.

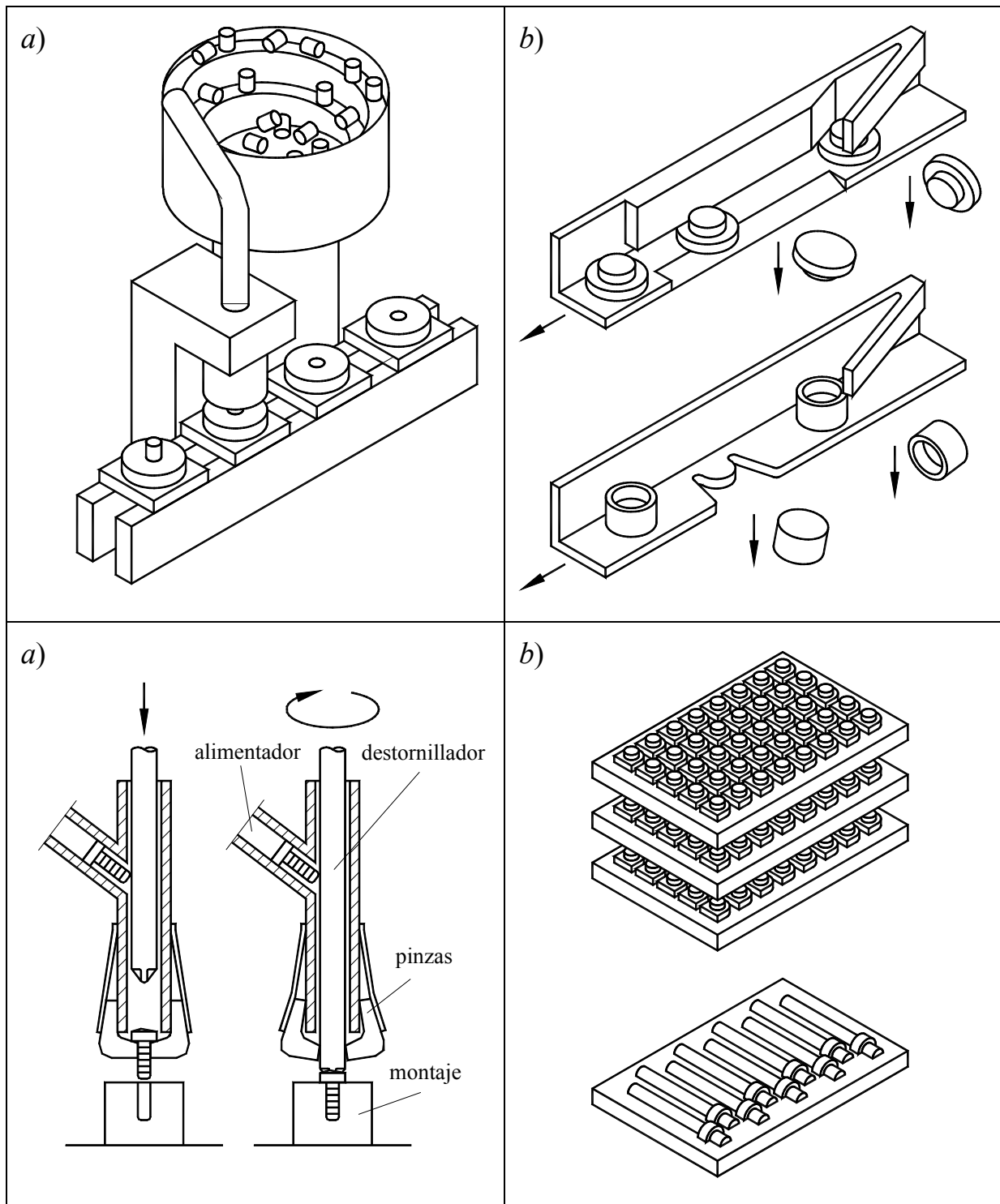


Figura 3.7 Diversos sistemas relacionados con la ordenación de piezas: *a)* Dispositivo vibratorio de alimentación de una línea; *b)* Trampas mecánicas para eliminar orientaciones no deseadas; *c)* Dispositivo para la alimentación de tornillos; *d)* Ordenaciones unidimensional, bidimensional y tridimensional en un sistema de paletización.

Soluciones constructivas para la conformación y manipulación

El diseñador puede tener una gran influencia en los costes y tiempos de fabricación, así como en la calidad de los productos. En efecto, las decisiones que va tomando sobre materiales, formas, dimensiones, tolerancias, acabados superficiales, componentes y uniones, afectan a aspectos tan determinantes como:

- El tipo de *proceso de fabricación* necesario
- Las *máquinas*, los *útiles* y los *instrumentos de medida* utilizados
- Los requerimientos de *manipulación*, *transporte interior* y *almacenamiento*
- La elección entre fabricación *propia* o *subcontratación*
- La posibilidad de utilizar productos *semielaborados*
- Los *procedimientos de control*

En este sentido son de gran utilidad las *guías de referencia* para orientar el diseño para la conformación, relacionadas con los principales *procesos de fabricación*. A continuación se dan unos resúmenes de algunas de estas guías de referencia.

En ellas se indican, para cada una de las recomendaciones, las etapas en las que tienen más incidencia (D = diseño; U = utillaje; P = proceso; M = mecanizado posterior) y los efectos en los que tienen más repercusión (C = coste; Q = calidad):

Guía de referencia para el diseño de piezas fundidas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar formar cuerpos sencillos de fácil desmoldeo, a ser posible sin la necesidad de noyos (o núcleos)	D, U	C
Prever los ángulos de desmoldeo, especialmente si las paredes son altas	D	Q
Evitar el descentrado de los noyos (o núcleos) y paredes de distinto grosor. Si es necesario, apoyar el noyos (o núcleos) por dos puntos	D, U, P	C, Q
Procurar en toda la pieza paredes aproximadamente del mismo grosor. En todo caso, las transiciones deben ser progresivas	D, P	Q
Evitar concentraciones de nervios en un mismo punto	P	Q
Facilitar el mecanizado por medio de resaltes en las zonas que deban mecanizarse	M	C
Orientar correctamente las superficies a mecanizar en relación a las herramientas (dirección de las brocas, de las fresas)	M	C, Q

Guía de referencia para el diseño de piezas forjadas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar formas sencillas, a ser posible con simetrías	U, P	C
Eliminar rebajes que impidan la separación de la matriz	D, U	C
Prever los ángulos de desmoldeo especialmente si las paredes son altas. Procurar repartir los ángulos de desmoldeo a ambos lados de la partición	D, U	C, Q
Evitar las superficies de partición complejas	U	C, Q
Evitar secciones excesivamente delgadas. Evitar cambios abruptos de la sección que puedan tener incidencia sobre la matriz	U, P	Q
Evitar radios de enlace y agujeros excesivamente pequeños	U, P	C, Q
Orientar correctamente las superficies a mecanizar en relación a las herramientas (de las brocas, de las fresas)	M	C Q

Guía de referencia para el diseño de piezas taladradas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar realizar los agujeros pasantes	D, P	C
Hacer que las superficies de entrada y salida de la perforación sean perpendiculares a la dirección de la herramienta	D, P	Q
Prever las formas adecuadas para los agujeros ciegos. Si deben roscarse, prever una longitud de agujero mayor	D, U, P	C, Q

Guía de referencia para el diseño de piezas torneadas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar dar formas simples. Prever los radios de acuerdo adecuados para las herramientas	D, U, P	C
Evitar ranuras y formas interiores, especialmente si deben tener tolerancias estrechas	D, U, P	C
Prever las zonas de agarre y, en su caso, de apoyo del extremo	D, P	C
Evitar tornear piezas con diferencias de diámetro excesivas	D, P	C
Dar tolerancias estrechas solo a las partes que lo requieran	P	C, Q

Guía de referencia para el diseño de piezas fresadas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Establecer, a ser posible, superficies de fresado planas. Evitar la multiplicidad de superficies y de orientaciones	D, P	C
Prever el radio de la fresa en las formas de la pieza (redondeos)	D, U	C, Q
Seleccionar adecuadamente las superficies de fresado para facilitar la accesibilidad de las herramientas	D, P	C, Q
Prever resaltes en las partes que deban ser fresadas	D, P	C

Guía de referencia para el diseño de piezas rectificadas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Prever sobrespesores en las zonas que deban rectificarse	P	C
Prever las salidas de la herramienta y evitar limitaciones al movimiento de la muela abrasiva	D, U, P	C, Q
Evitar, sino hay razones funcionales de sentido contrario, distintas calidades de rectificado en una misma pieza	D, P	C, Q
Elegir las superficies a rectificar de forma que faciliten la accesibilidad de las muelas	D, U, P	Q, Q

Guía de referencia para el diseño de piezas sinterizadas

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Evitar los redondeos y también las aristas cortantes	D, U	C, Q
Evitar los ángulos agudos y las formas que se adelgazan	P	Q
Observar los siguientes límites: altura/anchura < 2,5; espesor de pared > 2 mm; diámetro de agujero > 2 mm	D, P	C, Q
Evitar tolerancias excesivamente pequeñas	P	Q
Evitar figuras y dentados excesivamente pequeños	P	Q

Guía de referencia para el diseño de piezas de chapa doblada

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Evitar piezas con un número excesivo de pliegues. A ser posible, repartirlos en varias piezas	D, P	C
Dar un valor mínimo al radio interior de plegado (\geq espesor)	D, P	Q
Prever una distancia suficiente para el doblado de los agujeros o cortes anteriores. Es preferible doblar el corte por el medio	D, P	Q
Evitar cortes en diagonal en las zonas de doblado	D, P	Q
Disponer cierto huelgo en las pestañas dobladas de una misma esquina	D, P	Q

Guía de referencia para el diseño de piezas de chapa cortadas con matriz

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar formas sencillas y evitar esquinas afiladas (exteriores e interiores). Limitar, a ser posible, la longitud de corte	D, U, P	C
Disponer las pieza en el fleje de forma que se produzcan los mínimos desperdicios	U	C
Evitar ángulos agudos y partes excesivamente delgadas	D, U	Q
Procurar que los sucesivos cortes no dañen los anteriores	D, U	C, Q

Guía de referencia para el diseño de conjuntos soldados

Recomendaciones	Etapas	Efectos
Procurar que el conjunto esté formado por las mínimas piezas y los mínimos cordones de soldadura	D, P	C
Prever la situación de los cordones de soldadura para facilitar el acceso de las herramientas de soldar	D, U	C, Q
Evitar la acumulación de soldaduras en un punto	D	Q
Disponer el conjunto de forma que las tensiones de contracción sean las mínimas	D, P	Q
Facilitar el posicionado relativo de las pieza antes de la soldadura. En todo caso, prever los utillajes	D, P	Q

Tecnología de grupos

La *tecnología de grupos* (GT, *group technology*, en inglés) es una filosofía de producción que identifica y agrupa las piezas que presentan similitudes en *familias de piezas* a fin de facilitar las tareas de fabricación y también las de diseño.

En general, cualquier producción comporta la fabricación de un gran número de piezas diferentes (1.000, 2.000 ó 5.000); sin embargo, una vez agrupadas puede que tan solo haya 25, 40 ó 60 *familias de piezas*, cada una de las cuales presenta características análogas de fabricación y/o de diseño.

Familias de piezas

Una *familia de piezas* es un conjunto de piezas fabricada por una empresa que, a pesar de ser distintas, presentan determinadas similitudes o atributos:

Familias de piezas de fabricación

Gracias a los *atributos de fabricación* (materiales, tipos y secuencias de operaciones, campos de tolerancia, series de fabricación), sus miembros presentan analogías en relación a la fabricación, por lo que se posibilita una mayor eficacia en la producción. Para ello, la *tecnología de grupos* propugna agrupar las máquinas y equipos que intervienen en la fabricación de una *familia*, en una *célula de fabricación* para facilitar el flujo de los materiales y las operaciones de trabajo.

Familias de piezas de diseño

Gracias a los *atributos de diseño* (formas geométricas, dimensiones), sus miembros presentan analogías en relación al diseño, lo que también puede redundar en ventajas en este campo. En efecto, a partir de una buena base de datos de familias de piezas de la empresa es fácil la búsqueda de piezas similares que, o bien cubren directamente la nueva necesidad (se evita crear una nueva pieza), o bien facilitan su diseño en base a pequeñas modificaciones.

Estas ventajas se relacionan con la *codificación y clasificación* de las piezas, uno de los aspectos centrales de la *tecnología de grupos*.

La Figura 3.8a muestra dos piezas idénticas desde el punto de vista geométrico pero totalmente distintas desde el punto de vista de fabricación (material; tamaño de la serie; campo de tolerancia). Por lo tanto, formarían parte de una misma familia de piezas de diseño pero de distintas familias de piezas de fabricación.

La Figura 3.8b muestra dos piezas que son diferentes desde el punto de vista geométrico (sus formas y disposiciones obligan a definiciones diferentes: distintas simetrías, distintas forma del cuerpo). Sin embargo, formarían parte de una misma familia de piezas de fabricación ya que los procesos de fabricación son análogos (torneado, agujeros en la misma dirección).

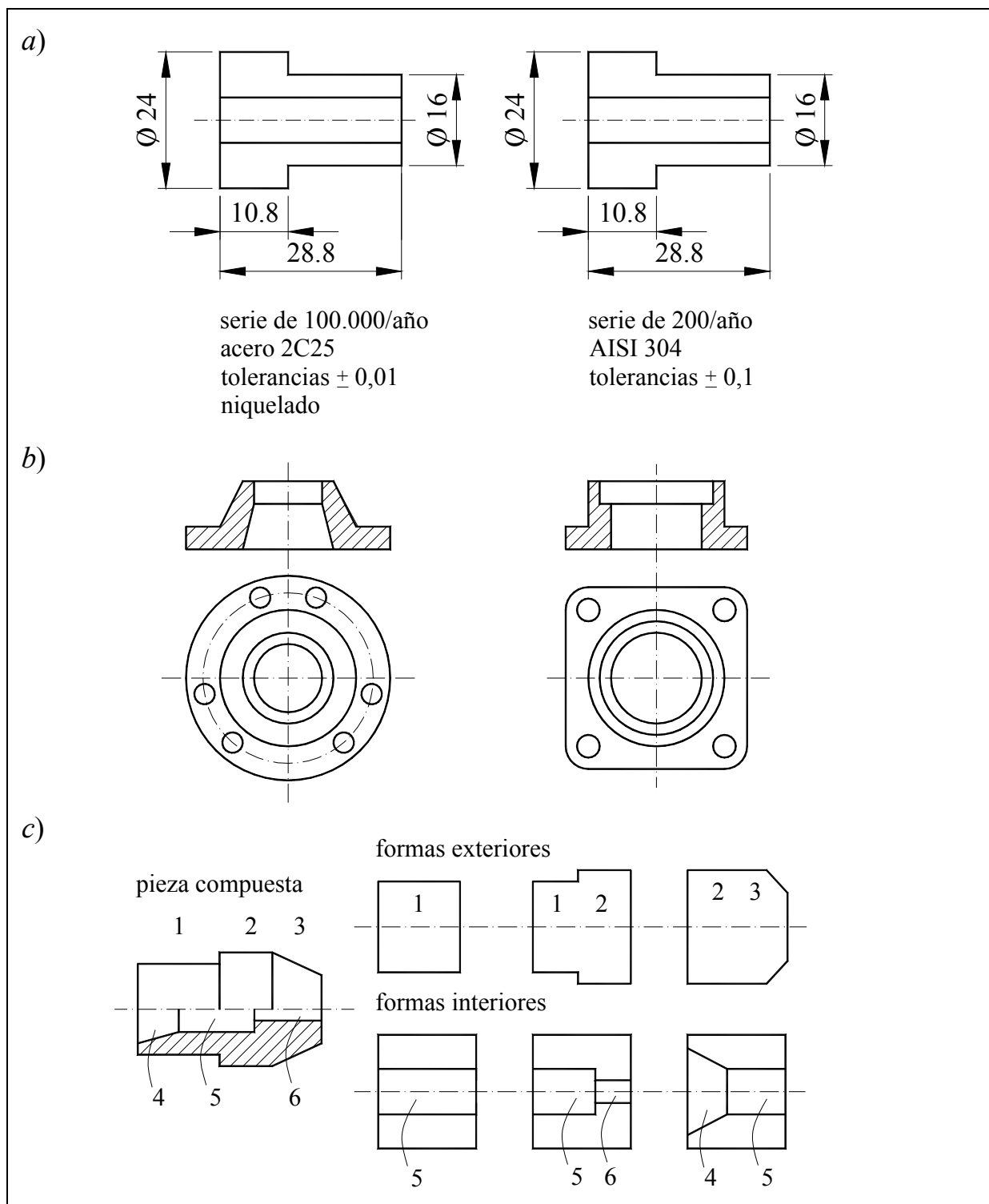


Figura 3.8 Distintos aspectos de la teoría de grupos: a) Dos piezas que pertenecen a la misma familia de diseño pero a distinta familia de fabricación; b) Dos piezas que pertenecen a distintas familias de fabricación pero a la misma familia de diseño; c) Pieza compuesta, con posibles ejemplos de formas exteriores y formas interiores

Pieza compuesta

Las *familias de piezas* se definen a partir de la similitud de los atributos de diseño y de fabricación de sus miembros. Partiendo de esta definición, una *pieza compuesta* sería aquella que contiene todos los atributos de las piezas que configuran una *familia de piezas*, de manera que cualquier pieza de la familia tiene como máximo los mismos atributos que la *pieza compuesta* (ver Figura 3.8c). Una *célula de fabricación* diseñada para la fabricación de una *pieza compuesta* sería capaz, pues, de fabricar cualquier pieza de esta familia.

Distribución en planta de las máquinas

Distribución funcional

La tendencia tradicional de las empresas ha sido organizar las máquinas en los talleres por secciones funcionales, para la fabricación por lotes. Durante el proceso, cada pieza realiza un largo recorrido, eventualmente con retornos sobre las mismas secciones, lo que comporta una gran cantidad de manipulación, un volumen importante de material circulante, un tiempo total de proceso muy largo y en consecuencia, unos costes elevados.

Distribución por grupos

A la luz de la *teoría de grupos* una solución alternativa consiste en organizar los talleres por grupos de máquinas que intervienen en la fabricación de las principales familias de piezas. Esta alternativa genera varias ventajas (reduce la manipulación y el material circulante, disminuye los tiempos de puesta a punto y de proceso) lo que en definitiva se traduce en reducción los costes.

Sin embargo, la principal dificultad para pasar de una distribución funcional a una distribución por grupos es la formación de las *familias de piezas*. Para ello se han utilizado tres métodos que requieren un consumo de tiempo considerable en el análisis de un volumen de datos muy importante (cuando se tienen):

- a) *Inspección visual*. Se inspeccionan visualmente las piezas y se clasifican por familias. A pesar de ser el menos preciso es el más rápido y económico.
- b) *Clasificación por codificación*. En base a uno de los numerosos sistemas existentes en el mercado (incluso en software), se codifican y clasifican las piezas. Es el método más utilizado en la *tecnología de grupos*.
- c) *Análisis del flujo de producción* (PFA, *production flow analysis*). Se analizan las hojas de ruta de las piezas y las que presentan similitudes se clasifican en la misma familia.

Codificación y clasificación de piezas

Han sido desarrollados numerosos sistemas de codificación y clasificación de piezas, pero ninguno de ellos ha sido aceptado de forma general, puesto que deben adaptarse a las necesidades de cada empresa. Se distinguen:

- a) Sistemas basados en *atributos de diseño* (formas, dimensiones, tolerancias, tipo de material, acabado superficial, función de la pieza)
- b) Sistemas basados en *atributos de fabricación* (procesos y operaciones, tiempo de fabricación, lotes y producción anual, máquinas y útiles necesarios)
- c) Sistemas mixtos basados en *atributos de diseño y de fabricación*

La codificación consiste en una secuencia de dígitos para identificar los atributos de diseño y de fabricación de las piezas: puede tener una estructura *jerárquica* (la interpretación de cada dígito depende de los valores de los dígitos anteriores) o *en cadena* (la interpretación de cada dígito es fija). Desde 1965 se han desarrollado numerosos sistemas de codificación y clasificación con códigos de 4 a 30 dígitos. Los más simples están limitados para discriminar los numerosos atributos de diseño y fabricación de las piezas mientras que la aplicación de los más complejos conlleva una gran carga de trabajo. Entre estos sistemas se citan los siguientes:

Sistema de codificación de Opitz

Uno de los sistemas pioneros (Opitz, Universidad de Aquisgran, Alemania, 1970) para implantar la tecnología de grupos. Parte de un código básico de 9 dígitos: los cinco primeros 1,2,3,4,5 (código de forma) describen los principales atributos de la pieza, mientras que los 4 restantes 6, 7, 8, 9 (código suplementario) describen algunos de sus atributos de fabricación. Pueden añadirse 4 dígitos más A, B, C y D (código secundario), fijados por el usuario y destinados a identificar el tipo y secuencia de las operaciones de fabricación.

Sistema de codificación MultiClas

Desarrollado por la "Organization for Industrial Research" (OIR), es muy flexible y puede ser personalizado. Presenta una estructura jerárquica con un código de hasta 30 dígitos, repartidos en una parte fijada por la OIR (0 prefijo; 1 forma principal; 2,3 configuración externa/interna; 4, elementos secundarios mecanizados; 5,6 descriptores funcionales; de 7-12 datos dimensionales; 13 tolerancias; 14,15 composición del material; 16 forma de la materia prima; 17 volumen de producción; 18 elementos de mecanizado) y otra diseñada según necesidades de la empresa.

Análisis del flujo de producción (PFA, *production flow analysis*)

Es un método para identificar las *familias de piezas* y la creación de *grupos de máquinas* basado en el análisis de la secuencia de operaciones y de las hojas de ruta de las piezas.

El análisis del flujo de producción puede organizarse siguiendo los pasos:

1. *Recoger los datos.* Se establece la población de piezas a analizar y se recogen los datos necesarios.
2. *Clasificar según rutas de proceso.* Las piezas con idéntica ruta de proceso se agrupan en paquetes ("packs")
3. *Establecer la carta PFA.* Se presenta un cuadro entre los códigos de los paquetes y los códigos de máquinas
4. *Analizar.* Se reordena el cuadro para formar los paquetes.

El análisis es a la vez el paso más difícil y fundamental del método PFA. Se trata de reordenar los datos de la tabla PFA original a fin de agrupar las piezas en diferentes paquetes con rutas de proceso similares. El conjunto de máquinas que da servicio a un paquete de piezas podría formar una célula de fabricación.

Ejemplo 3.1

Aplicación del método PFA a un caso hipotético

Para simplificar, se supone que se analiza un conjunto de 10 piezas (1 a 10) que son fabricadas con 12 máquinas (de la A a la L). La tabla PFA inicial (por orden de pieza considerada) se sitúa a la izquierda. Después de un trabajo de análisis el resultado es la tabla de la derecha. En ella se observa que se pueden formar tres paquetes con sus correspondientes grupos de máquinas que podrían constituir células de fabricación: (paquete 159 y máquinas ACFGH; paquete 2378 y máquinas EHIJ; paquete 4610 y máquinas BDE).

Tabla PFA
(inicial)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	x	x			x				x	
B				x		x		x	x	
C	x						x	x	x	
D				x		x				x
E		x	x	x	x	x		x		x
F	x				x	x	x		x	
G	x		x				x		x	
H	x	x	x		x			x	x	x
I		x	x				x	x		
J		x					x	x		
K		x	x	x		x	x			x
L				x		x				x

(analizada)

	1	5	9	2	3	7	8	4	6	10
A	x	x	x	x						
B			x				x	x	x	
C	x		x			x	x			
D								x	x	x
E		x		x	x		x	x	x	x
F	x	x	x			x			x	
G	x		x		x	x				
H	x	x	x	x	x		x			x
I				x	x	x	x			
J				x		x	x			
K				x	x	x		x	x	x
L								x	x	x

3.3 Diseño para el montaje (DFA)

Operaciones de montaje

El *montaje* de un producto consiste en la *manipulación y composición* de diversas piezas y componentes, la *unión* entre ellas, su *ajuste*, la *puesta a punto* y la *verificación* de un conjunto para que el mismo adquiera la funcionalidad para la cual ha sido concebido. En el montaje confluyen, pues, un conjunto complejo de operaciones que hay que distinguir cuidadosamente en el momento de su análisis:

- a) Manipulación de piezas y componentes:
 - a1) Reconocimiento de una pieza o componente
 - a2) Determinación de la zona de presión
 - a3) Realización de la operación de presión
 - a4) Movimientos de posicionamiento y de orientación
- b) Composición de piezas y de componentes:
 - b1) Yuxtaposición de piezas
 - b2) Inserción (eje en un alojamiento, corredera en una guía)
 - b3) Colocación de cables y conducciones
 - b4) Llenado de recipientes y depósitos (engrase, líquidos, gases)
- c) Unión de piezas y de componentes
 - c1) Uniones desmontables (roscadas, pasadores, chavetas)
 - c2) Encaje por fuerza (calado de piezas, unión elástica)
 - c3) Uniones por deformación (remaches, rebordonado)
 - c4) Uniones permanentes (soldadura, encolado)
- d) Operaciones de ajuste
 - d1) Retoque de piezas (rebabas, lima, ajuste por deformación)
 - d1) Operaciones de ajuste mecánico (conos, micro ruptores)
 - d2) Operaciones de ajuste eléctrico (potenciómetros, condensadores)
- e) Operaciones de verificación
 - e1) Puesta a punto (regulaciones, inicialización informática)
 - e2) Verificación de la funcionalidad del producto

A pesar de que se podría argumentar que las operaciones de puesta a punto y verificación no corresponden propiamente al montaje, lo cierto es que están íntimamente ligadas (aseguran la funcionalidad del conjunto), por lo que es conveniente incluirlas aquí.

Carácter integrador del montaje

El montaje tiene un carácter integrador por excelencia en el seno del proceso productivo. Es el "momento de la verdad", cuando queda de manifiesto que todas las piezas y componentes encajan y se interrelacionan correctamente para proporcionar la función para la cual ha sido concebido el producto.

Se detectan de forma inmediata muchos de los defectos de concepto en su diseño, así como los de ejecución durante su fabricación. A continuación se citan varios de los defectos más frecuentes en las operaciones de montaje y verificación:

- a) Defectos que inciden en las operaciones de manipulación:
 - Dificultad en el reconocimiento de piezas
 - Dificultad en la referenciación de piezas
 - Dificultad de prensión
 - Dimensiones o formas de difícil manipulación
 - Roturas en la manipulación y en la inserción
- b) Defectos que inciden en las operaciones de composición:
 - Errores dimensionales y de forma
 - Elementos deformados (fundición, soldadura, tratamientos térmicos)
 - Tolerancias excesivamente críticas
 - Falta de referencia en la yuxtaposición de elementos
 - Falta de elementos de guía en las inserciones
- c) Defectos que inciden en las operaciones de unión:
 - Acceso difícil a los puntos de unión
 - Limitaciones en los movimientos para la unión
 - Incorrecto encaje de las piezas (especialmente en chapas)
 - Contaminación de superficies (soldadura, encolado)
- d) Defectos que inciden en la funcionalidad y la calidad:
 - Mal funcionamiento de los enlaces (articulaciones, guías, rótulas)
 - Sujeción deficiente de piezas y componentes
 - Dispositivos que se desajustan o que fallan
 - Defectos en la apariencia de las partes externas
 - Dificultad de desmontaje (disminución de la disponibilidad)

Por lo tanto, la consideración de las operaciones de montaje de un producto o de una máquina presentan un punto de vista extraordinariamente enriquecedor que puede aportar mucha luz sobre aspectos relacionados tanto con la productividad y disminución de costes, como con la funcionalidad y la calidad.

No es de extrañar, pues, la reciente tendencia en las industrias con producto propio de subcontratar una parte importante de la fabricación de piezas y componentes y al mismo tiempo reservarse las operaciones de montaje final, puesta a punto y verificación como la garantía de una correcta funcionalidad y calidad del producto.

Montaje y automatización

Durante las últimas décadas, a través de la incorporación progresiva del control numérico y mejora de los sistemas automáticos de manipulación, se han realizado importantes progresos en la automatización de los procesos de fabricación de piezas y componentes. Sin embargo, si bien ha habido significativos avances en los procesos de montaje, buena parte de ellos continúan siendo manuales y requieren un volumen de mano de obra que incide entre el 25% y el 75% de los costes totales de producción.

Los procesos de montaje, ajuste y verificación constituyen, pues, una importante área donde orientar los esfuerzos. Como ya se ha dicho anteriormente, la mejora del montaje se puede abordar básicamente desde dos puntos de vista:

a) *La automatización de los procesos de montaje*

Este puede ser el primer impulso al abordar la mejora de la productividad en el montaje y consiste básicamente en automatizar aquello que hasta el momento se realiza a mano. Siguiendo el orden creciente de las inversiones necesarias, la automatización se puede realizar a distintos niveles según el carácter del producto y el volumen de producción:

a1) *Asistencia al montaje manual*

Introducción de ciertos útiles para facilitar el montaje manual (ayudas a la inserción, precompresión de muelles, elementos de referencia). Este sistema, muy utilizado en la industria, sin ser propiamente una automatización puede disminuir substancialmente el trabajo manual necesario.

a2) *Montaje automatizado (medios genéricos)*

Se realiza a través de aplicar medios genéricos de montaje, especialmente con sistemas robóticos y el correspondiente utillaje. Presenta la ventaja de la flexibilidad (y la posible reutilización de los equipos), si bien la productividad es menor que con medios específicos.

a3) *Montaje automatizado (medios específicos)*

Se realiza a través de la construcción de medios específicos (máquinas y líneas construidas expresamente) destinadas al montaje automatizado de un producto determinado. Son sistemas de gran productividad que, sin embargo, requieren una elevada inversión difícilmente recuperable.

b) *El diseño para el montaje*

Este es un punto de vista más radical (más a la raíz) del problema del montaje. Consiste en reconsiderar el diseño global del producto tomando como objetivo la facilidad y la calidad del montaje y, en definitiva, la reducción de costes (sin olvidar el punto de vista funcional, finalidad principal del producto).

El diseño para el montaje es útil y conveniente, independientemente del tipo de montaje que se considere (manual asistido, automatizado con medios genéricos o automatizado con medios específicos).

La simple automatización del proceso de montaje manual obliga a grandes inversiones en equipo y maquinaria que, a menudo, sólo aportan mejoras limitadas. Ello se explica por el hecho de que el montaje tradicional se basa en la extraordinaria habilidad y flexibilidad de las personas que las máquinas difícilmente pueden conseguir y, en todo caso, a un coste prohibitivo.

El diseño para el montaje empuja hacia el rediseño del producto y ofrece un potencial mucho mayor para reducir los costes de producción. En efecto, las Figuras 1.1 y 1.3 (Capítulo 1) muestran que, para el caso del conjunto considerado, si se sigue el camino de la automatización flexible (o robótica), se puede conseguir un ahorro del 50% o más respecto al montaje manual y, con un sistema automático específico (o rígido), un 75% o más, mientras que si se elige el camino del rediseño, se puede llegar a obtener un ahorro superior al 80% manteniendo el montaje manual (mayor flexibilidad) y con una inversión inferior.

Recomendaciones al diseño para el montaje

Las principales recomendaciones para el diseño de un nuevo producto o el rediseño de un producto existente teniendo presente el montaje, son:

1) *Estructurar en módulos*

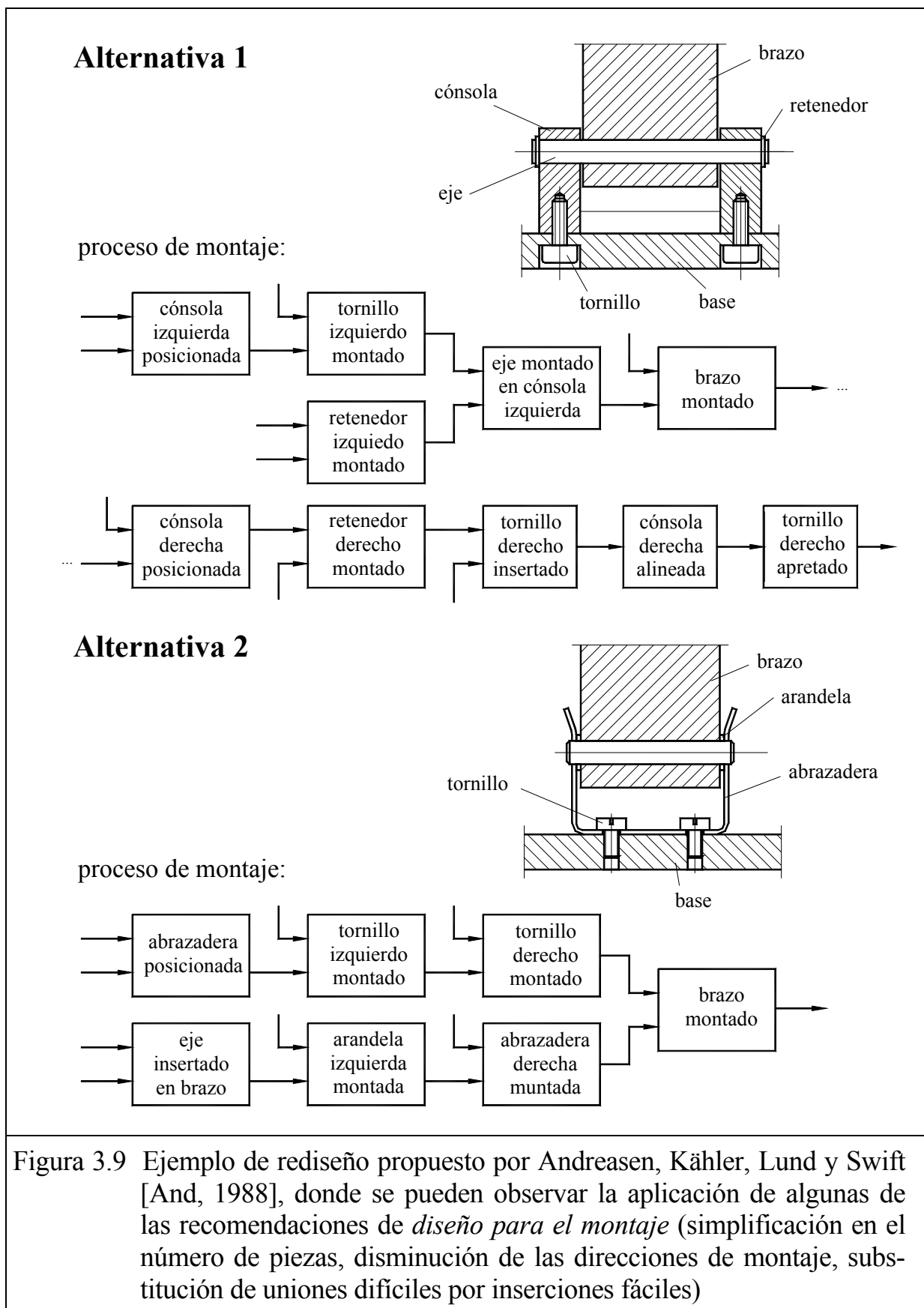
Establecer una adecuada estructuración modular del producto con funciones correctamente definidas y asignadas y unas adecuadas interfases mecánicas, de materiales, energía y señales.

2) *Disminuir la complejidad*

Minimizar el número y la diversidad de las piezas y componentes que intervienen en cada módulo o en el producto completo, así como el número de uniones, enlaces y otras interfases.

3) *Establecer un elemento de base*

Asegurar que cada módulo (o el producto, si este es de estructura simple) tenga un elemento estructural adecuado que a la vez sustente y sirva de base o de referencia al resto de las piezas y componentes del módulo.



4) *Limitar las direcciones de montaje*

Procurar que el montaje de un producto tenga el número mínimo de direcciones de montaje (los dos sentidos de una dirección cuentan doble).

5) *Facilitar la composición*

Facilitar la composición de piezas (especialmente las inserciones) por medio de chaflanes, planos inclinados, superficies de guía y otros elementos que faciliten estas operaciones.

6) *Simplificar las uniones*

Disminuir o evitar, si es posible, las uniones. En todo caso, reducir al máximo las uniones de mayor coste en tiempo de montaje y de materiales (uniones atornilladas, soldadura).

A continuación se analizan cada una de las anteriores recomendaciones para el *diseño para el montaje* (DFA, *design for assembly*):

Estructuración modular

Como ya se ha comentado en la Sección 3.1, la *modularidad* es un concepto básico para un buen diseño (o rediseño) para el montaje. Consiste en agrupar las diferentes funciones que debe realizar un producto, o las distintas secuencias de su fabricación, en *módulos* unidos por interfases mecánicas, de materiales, de energía y de señales claramente definidas. Una buena estructuración modular incide de forma beneficiosa en numerosos aspectos del producto:

- a) Mayor flexibilidad en la fabricación: subcontratación de piezas y conjuntos, incorporación de componentes de mercado
- b) Racionalización de variantes: delimitación de subgrupos con variantes
- c) Mayor facilidad de montaje: pocas interfases claramente establecidas
- d) Mejora la fiabilidad del conjunto: verificación previa al montaje
- e) Facilidad de diagnóstico de averías
- f) Mejora de la mantenibilidad, la facilidad de desmontaje y la substitución de piezas y componentes

El establecimiento de una buena estructuración modular de un producto es uno de los pilares básicos del diseño para el montaje. Es algo parecido a poner orden al material de trabajo. Además, la estructuración modular va a determinar en gran medida las secuencias de montaje del producto.

Disminución de la complejidad

La disminución de la complejidad (tema también tratado en la Sección 3.1) se corresponde con la disminución del número y variedad de piezas y de componentes de un producto y del número de interfases mecánicas, de materiales, energía y señales. Tiene los siguientes efectos beneficiosos:

- a) Disminuye el número total de piezas a conformar. Y tiende a agruparlas en un número menor de piezas distintas (aumento de los volúmenes de fabricación)
- b) Disminuye el número de superficies mecanizadas (centradores, tolerancias ajustadas, ajustes). Y, disminuye el número de uniones y enlaces
- c) Disminuye las operaciones de montaje (menos partes, menos uniones)
- d) Hace más fiable el conjunto (menos partes e interfases susceptibles de fallar)
- e) Mejora la mantenibilidad (mayor facilidad de montaje y desmontaje)

En la decisión de eliminar una pieza o refundir dos o más piezas en una, hay que formularse sistemáticamente las siguientes preguntas sobre cada pieza o componente:

- 1) ¿Se mueve en relación con el resto de piezas del sistema?
- 2) ¿Hay motivos funcionales para que el material sea distinto al de las piezas de su entorno?
- 3) ¿Debe poder separarse por razones de montaje?

Si la respuesta a estas tres preguntas es negativa, puede pensarse en transferir las funciones de la pieza a otra de su entorno y eliminarla. En este caso, hay que formularse una cuarta pregunta:

- 4) ¿La fabricación de una sola pieza en lugar de las dos (o más) que sustituye resulta más barata?

A pesar de que la respuesta a esta nueva pregunta sea negativa, la substitución de varias piezas por una puede continuar siendo una buena opción si el ahorro en las operaciones asociadas de fabricación y montaje (preparación y lanzamiento de la producción, almacenaje, transporte, montaje, verificación) es superior al aumento del coste de conformación de la pieza única. A menudo suele ser así.

Elemento de base

Es conveniente establecer para cada uno de los módulos de un producto un elemento *de base* sobre el cual se referencien y queden unidos la mayor parte de las restantes piezas y componentes. La existencia de un solo elemento de base proporciona, en general, una mayor rigidez y unas referencias más precisas para el conjunto.

A menudo, con un adecuado diseño del elemento de base se suele obtener una de las mayores disminuciones de costes del producto. Los criterios para el diseño de elementos de base son:

- a) Debe procurarse dar las mínimas dimensiones compatibles con la funcionalidad, ya que las sobredimensiones solo disminuyen la rigidez y la resistencia.
- b) Debe procurarse llenar de material las líneas rectas que unen los puntos más solicitados (rodamientos, apoyo de guías, fuerzas exteriores), ya que así se consigue que el máximo volumen de material trabaje a tracción y compresión, lo que da la máxima resistencia y rigidez a la pieza.
- c) Es recomendable adoptar una combinación de formas simples (planas, de revolución) que faciliten la conformación. Las partes planas tienen poca consistencia y deben ser reforzadas con nervios o relieves.
- d) Las formas cerradas siempre son más rígidas que las abiertas, aspecto especialmente relevante en elementos sometidos a torsión y a flexión.
- e) Conviene que guarden el mayor número de simetrías respecto a las fuerzas aplicadas.

Caso 3.6

Elemento de base para el cabezal de una eólica doméstica

Un buen ejemplo son las alternativas desarrolladas para el elemento de base del cabezal de una eólica doméstica (Figura 3.10). Dado que sus dimensiones son reducidas y el rotor gira a velocidad elevada, la multiplicación entre el eje del rotor y el del generador se puede resolver mediante una transmisión por correa.

La primera de las alternativas fue desarrollada en el marco de un proyecto de fin de carrera de la escuela de ingenieros de Barcelona (ETSEIB-UPC), mientras que la segunda propuesta fue sugerida por un miembro del tribunal calificador. La pregunta que desencadenó la sugerencia fue si era necesario que el generador estuviera debajo del eje del rotor. La respuesta fue obviamente negativa.

De ello surgió la idea de que este elemento base fuera una pieza de fundición con la forma que resulta de la intersección de dos tubos (las dos cajas de rodamientos, del mástil y del rotor) y con una articulación en la parte superior para el basculamiento del generador para conseguir el tensado de la correa.

La tapa se transforma en una cubierta entera (en lugar de las dos del diseño anterior, la posterior y la superior) que, además de facilitar los ajustes y el mantenimiento, protege mucho mejor de la lluvia. Esta cubierta puede ser realizada con materiales plásticos o compuestos con el consiguiente abaratamiento de costes.

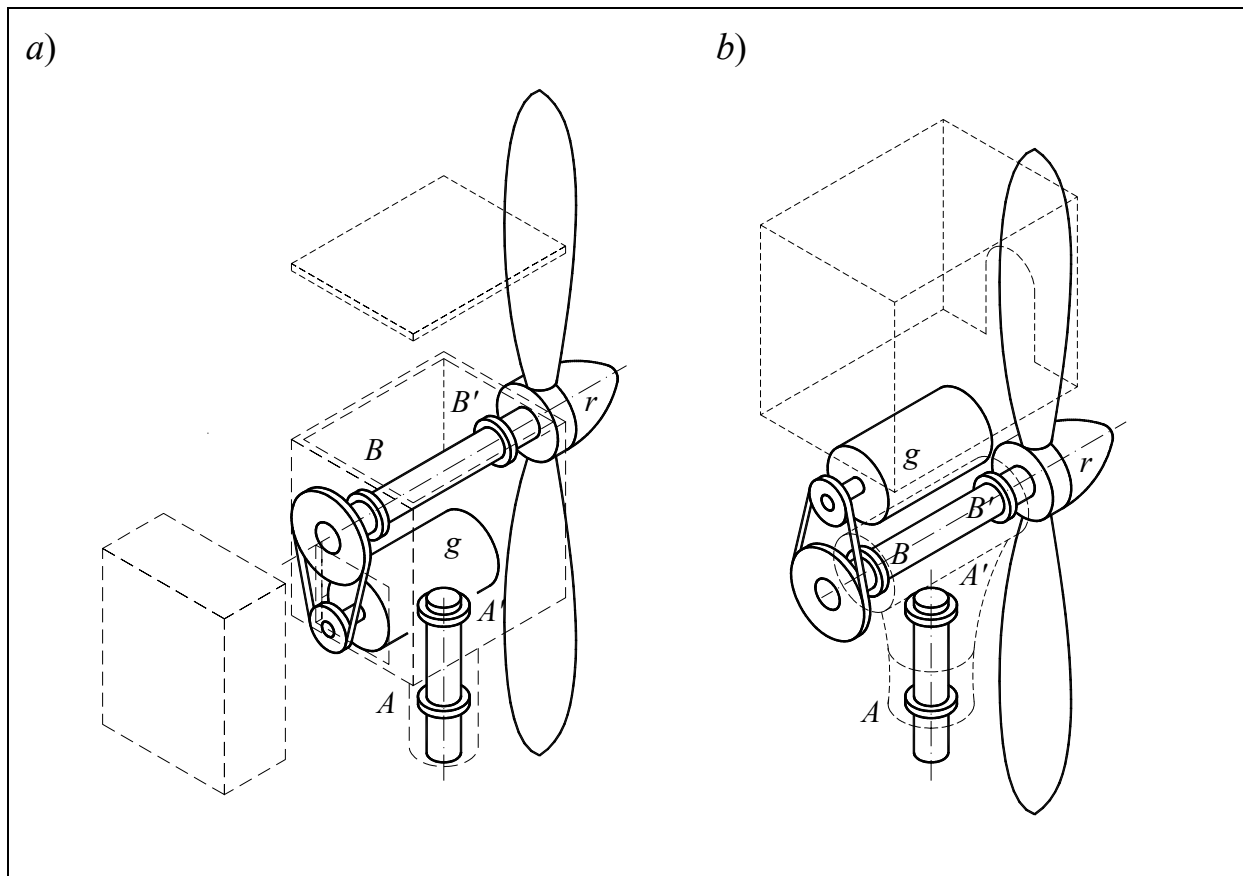


Figura 3.10 Alternativas para el elemento de base del cabezal de una eólica doméstica: *a)* Solución inicial; *b)* Solución alternativa con la incorporación de principios del diseño para el montaje.

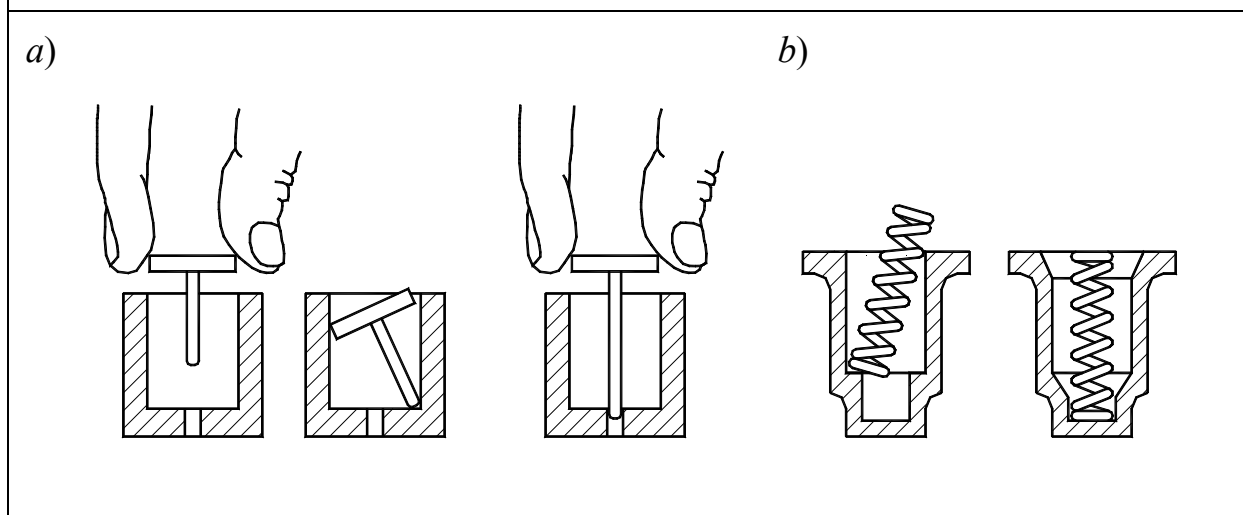


Figura 3.11 Alternativas para facilitar la composición de elementos: *a)* Inicialmente los dedos no pueden guiar la pieza en la inserción de su parte inferior ya que es demasiado corta; *b)* El cambio brusco de sección es un punto de enganche del muelle que se evita con un chaflán

Las recomendaciones anteriores tienen una aplicación directa a este caso:

- a) En la solución inicial del elemento de base (Figura 3.10a), al hacer las funciones de cierre exterior, obliga a las fuerzas que se transmiten entre los cuatro puntos sometidos a las máximas fuerzas (rodamientos de apoyo al mástil, puntos A y A' , y rodamientos del eje del rotor, puntos B y B') a contornear al generador, lo que convierte a la estructura en muy pesada y poco rígida
- b) En la solución alternativa (Figura 3.10b), el elemento de base está formado por dos tubos perpendiculares con unas transiciones en la zona de unión que siguen prácticamente las líneas que unen los puntos más solicitados
- c) Las formas adoptadas por el elemento de base son sencillas y cerradas
- d) Hay una notable simetría general entre la geometría del elemento y las fuerzas que se aplican.

Limitación de las direcciones de montaje

Conviene que el número de direcciones de montaje (composición, inserción, uniones roscadas, ecliquetajes) sea el mínimo posible; a poder ser, tan solo una. Los cambios de dirección de montaje implican una manipulación improductiva y, en los casos de automatización, un enorme aumento de la dificultad de la operación y un encarecimiento del equipo.

Ejemplo:

En la primera alternativa de la Figura 3.9, los soportes de la articulación se colocan desde arriba, mientras que los tornillos se colocan desde abajo (dos direcciones de montaje). En la segunda alternativa, tanto el soporte de la articulación como los tornillos se colocan por arriba (una sola dirección de montaje).

Facilidad de composición

Debe facilitarse la composición de los conjuntos, especialmente las inserciones, por medio de chaflanes, planos inclinados, superficies de guía y otros elementos que faciliten estas operaciones (ver Figura 3.11).

Facilitar la inserción de elementos y evitar los puntos de enganche entre piezas es un aspecto muy importante en la automatización del montaje ya que, de lo contrario, disponer de sistemas artificiales con la extraordinaria habilidad y flexibilidad humana resultaría excesivamente caro.

La orientación de las piezas y el establecimiento de simetrías son recursos que facilitan la manipulación en estas operaciones. También hay que tener en cuenta la accesibilidad necesaria en el proceso de montaje, ya sea manual o automatizado.

Sistemas de unión y conexión

La consideración de las uniones y conexiones son de vital importancia en la composición de un producto debido a que una parte muy importante del tiempo y coste total corresponde a las tareas de preparación y montaje de estos elementos. La primera recomendación es evitar las uniones siempre que sea posible y en caso contrario procurar simplificarlas al máximo. La Figura 3.12a muestra los costes relativos de algunos tipos de unión.

Hay que tener en cuenta que las uniones constituyen elementos básicos en los productos que afectan múltiples aspectos del diseño:

a) *Uniones demontables / Uniones permanentes*

Generalmente las uniones permanentes suelen ser más económicas que las uniones desmontables. Pero, por otra parte, las uniones desmontables permiten el mantenimiento del producto mientras que las uniones permanentes lo dificultan o incluso lo impiden

b) *Uniones para el montaje fácil / Uniones para el desguace*

El diseño para el montaje fácil va destinado a abaratar la producción, mientras que las uniones para el desguace (por desmontaje fácil, eventualmente por rotura o deformación permanente de ciertos elementos) van destinadas a facilitar el reciclaje de materiales (Sección 3.5). No siempre es fácil coordinar estos dos requerimientos y en muchos casos uno va en contra del otro

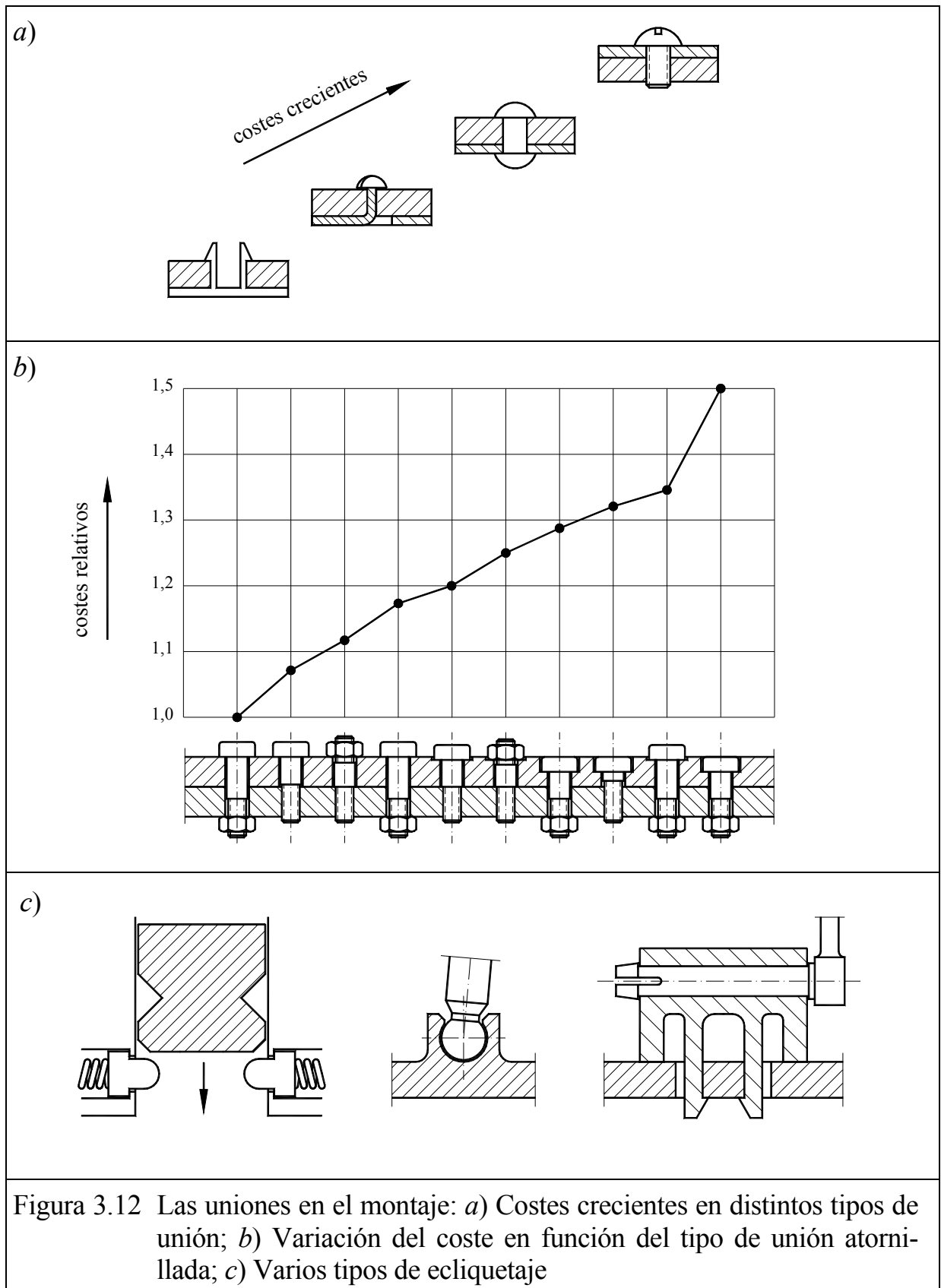
Uniones roscadas

Las uniones roscadas clásicas figuran entre las de coste más elevado, tanto por la preparación que requieren (mecanizado de los agujeros, de los asentamientos, eventualmente, de las roscas) como por el tiempo de montaje que comportan (el coste de los tornillos y tuercas suele tener poco impacto). Sin embargo, presentan la ventaja de su gran capacidad mecánica y la facilidad de desmontaje.

No todas las uniones atornilladas tienen los mismos costes, ya que varían los precios de los componentes (tornillos, tuercas, arandelas, elementos de retención) las tareas de preparación (agujeros ciegos o pasantes, con o sin rosca, con o sin asentamiento) y tiempos de montaje (Figura 3.12b).

Ecliquetajes

Entre las uniones para un montaje fácil tienen una gran difusión los ecliquetajes que son dispositivos que realizan la unión por medio de una fuerza elástica con la ayuda de un elemento de autocentrado. Generalmente son muy económicos, pero pueden presentar dificultades funcionales a causa de una fuerza de retención débil (la unión se deshace) o en el mantenimiento a causa de roturas en el desmontaje.



Evaluación del montaje manual. Método de Boothroyd & Dewhurst

En la aplicación del *diseño para el montaje*, además de nuevos conceptos y recomendaciones es importante disponer de métodos para evaluar las distintas soluciones generadas.

El *factor de complejidad*, C_f , puede proporcionar una primera evaluación cualitativa del montaje, pero es poco discriminatorio respecto a la incidencia en las manipulaciones y ensamblajes de los distintos tipos de piezas y uniones (no inciden lo mismo en el montaje un tapón de botella que un cable eléctrico, como tampoco son lo mismo 4 tornillos que 4 ecliquetajes).

Boothroyd y Dewhurst [Boo, 1986] propusieron en 1986 una metodología para estudiar con mayor profundidad el nivel de adecuación de una solución en relación al montaje por medio del cálculo de la *eficiencia de montaje* basada en la evaluación de los tiempos de las distintas operaciones de montaje.

Eficiencia de montaje

Parte de considerar que los principales factores que inciden en los costes del montaje son los siguientes:

N_{\min} = Número mínimo de piezas del conjunto considerado (eliminando las que no son funcionalmente necesarias)

t_a = Tiempo genérico de montaje de una pieza (se toma $t_a = 3$ segundos)

t_{ma} = Tiempo estimado para el montaje del producto real

A partir de estos factores, la fórmula para la eficiencia de montaje es:

$$E_{ma} = \frac{N_{\min} \cdot t_a}{t_{ma}}$$

El método de Boothroyd & Dewhurst incluye un código de dos dígitos para la clasificación de las operaciones de manipulación manual, otro código de dos dígitos para la clasificación de las operaciones de inserción y sujeción manuales y sendas tablas que ofrecen las estimaciones de estos tiempos (ver más adelante).

Sin embargo, vale la pena comentar algunos de los conceptos y parámetros que aparecen en estas tablas de Boothroyd & Dewhurst (simetrías, efecto de los grosores y dimensiones de las piezas, de las tolerancias y chaflanes, de las dificultades de acceso y visión) a fin de evaluar con precisión su significado y utilizarlas con conocimiento de causa.

Efectos de las simetrías

Unas de las principales características geométricas que afectan el tiempo requerido para coger y orientar una pieza son las simetrías. Se definen dos tipos de simetrías en las piezas (ver Figura 3.13a):

Simetría α , que depende del ángulo que debe girar una pieza alrededor de un eje perpendicular a la dirección de inserción

Simetría β , que depende del ángulo que debe girar una pieza alrededor de su eje de inserción

Efectos del grosor y de las dimensiones de las piezas

El tamaño y proporciones de las piezas tienen una gran influencia en su manipulación y, en concreto, en su prensión y orientación.

Grosor (Figura 3.13b), en una pieza cilíndrica (o poligonal de cinco o más lados), es el diámetro y, si éste es mayor que la longitud, las piezas son tratadas como no cilíndricas. En una pieza no cilíndrica es la altura máxima cuando su mayor dimensión se sitúa sobre una superficie plana.

Tamaño (Figura 3.13b) es la mayor dimensión no diagonal de la pieza cuando se proyecta sobre una superficie plana.

Efectos de las tolerancias y los chaflanes en las operaciones de inserción

En las operaciones de inserción, además de la influencia de la orientación (cuestión ya tratada en el apartado de simetrías), influyen las tolerancias y los chaflanes.

Cuanto menor es el juego entre perno y agujero mayor es el tiempo de inserción. Igualmente son beneficiosos los chaflanes en la inserción de tornillos y muelles.

La presencia de chaflanes, ya sea en el perno o en el agujero, facilitan en gran medida las operaciones de inserción.

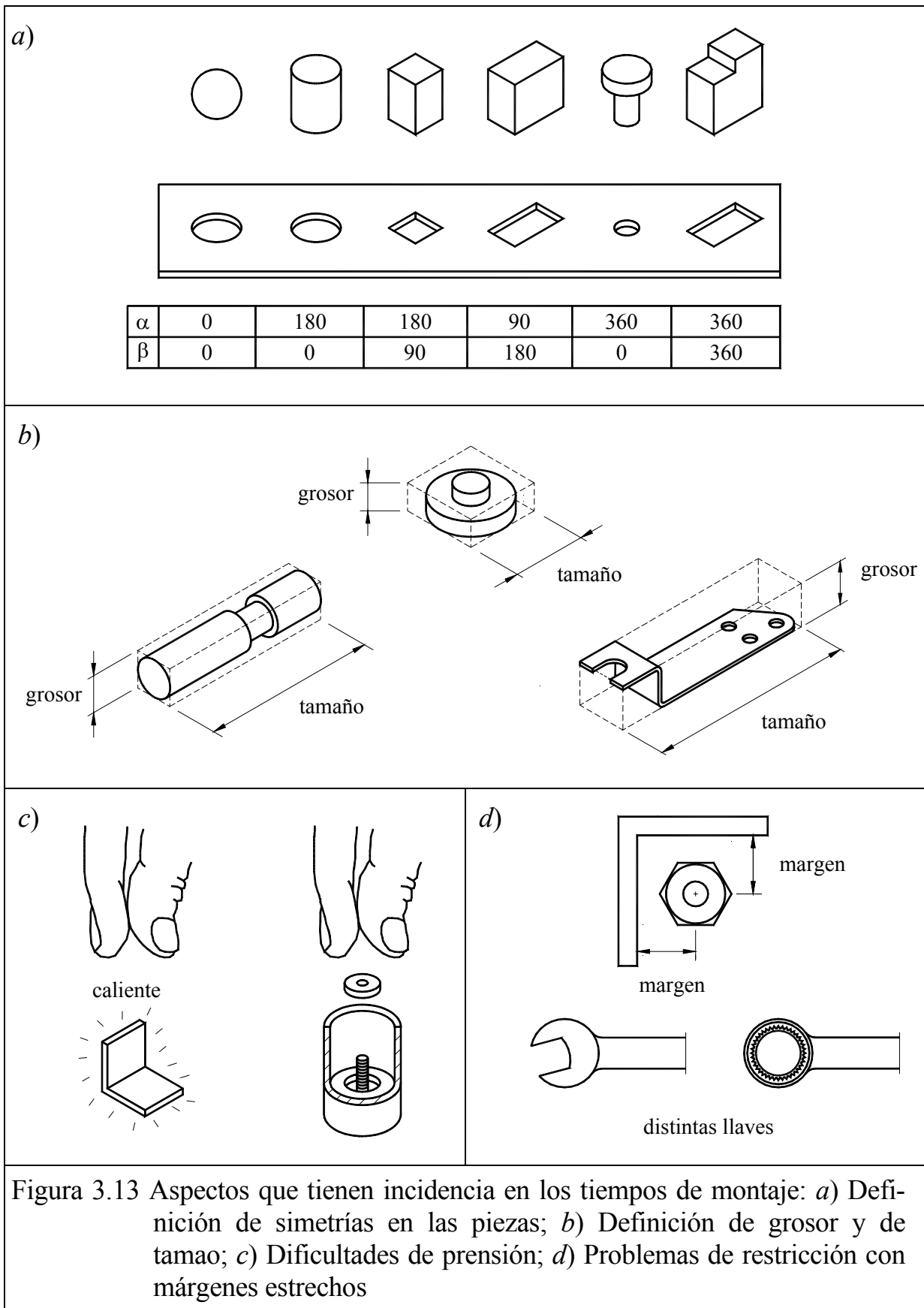
Efectos de la restricción de acceso o de visión

Se han realizado muchos trabajos experimentales sobre el tiempo necesario para insertar diferentes tipos de tornillos en diversas condiciones.

De ellos se deduce que en gran parte las restricciones visuales se resuelven a través de las percepciones táctiles. También se ha comprobado que, a partir de ciertos márgenes a los bordes, las restricciones al acceso ya no se disminuyen.

Efectos de la autorretención durante el montaje

Es un efecto a evitar, ya que comporta una gran pérdida de tiempo. Hay que analizar que no se produzcan autorretenciones en la manipulación ni en el montaje.



Tiempos estimados de manipulación manual (en segundos)

Piezas que pueden ser cogidas y manipuladas por una mano sin ayuda de útiles											
		fácil de coger y manipular					difícil de coger y manipular				
grosor		> 2			≤ 2		> 2			≤ 2	
tamaño		>15	6÷15	<6	>6	<6	>15	6÷15	<6	>6	<6
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$(\alpha+\beta)<360^\circ$	0	1,13	1,43	1,88	1,69	2,18	1,84	2,17	2,65	2,45	2,98
$360^\circ\leq(\alpha+\beta)<540^\circ$	1	1,50	1,80	2,25	2,06	2,55	2,25	2,57	3,06	3,00	3,38
$540^\circ\leq(\alpha+\beta)<720^\circ$	2	1,80	2,10	2,55	2,36	2,85	2,5	2,90	3,38	3,18	3,70
$(\alpha+\beta)=720^\circ$	3	1,95	2,25	2,70	2,51	3,00	2,73	3,06	3,55	3,34	4,00

Piezas que pueden ser cogidas y manipuladas por una mano con ayuda de útiles												
		se necesitan pinzas								otros útiles (no pinzas)	útiles especiales	
		sin ampliación óptica				con ampliación óptica						
coger y manipular		fácil		difícil		fácil		difícil				
grosor		>0,25	≤0,25	>0,25	≤0,25	>0,25	≤0,25	>0,25	≤0,25	>0,25	≤0,25	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\alpha\leq 180^\circ$	$0^\circ\leq\beta\leq 180^\circ$	4	3,60	6,85	4,35	7,60	5,60	8,35	6,35	8,60	7,80	7,00
	$\beta=360^\circ$	5	4,00	7,25	4,75	8,00	6,00	8,75	6,75	9,00	8,00	8,00
$\alpha=360^\circ$	$0^\circ\leq\beta\leq 180^\circ$	6	4,80	8,05	5,55	8,80	6,80	9,55	7,55	9,80	8,00	9,00
	$\beta=360^\circ$	7	5,10	8,35	5,85	9,10	7,10	9,55	7,85	10,1	9,00	10,0

Piezas liadas o flexibles que pueden cogerse con una mano (con o sin útiles)												
		sin dificultades adicionales					pegajosas, delicadas, resbaladizas					
		$\alpha\leq 180^\circ$			$\alpha=360^\circ$		$\alpha\leq 180^\circ$			$\alpha=360^\circ$		
tamaño		> 15	6÷15	<6	>6	<6	> 15	6÷15	<6	>6	<6	
con ayuda de útiles de prensión, si es necesario		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		8	4,10	4,50	5,10	5,60	6,75	5,00	5,25	5,85	6,35	7,00

Piezas grandes que requieren dos manos, dos personas o ayuda mecánica para la prensión y el transporte												
		se pueden manipular por una persona sin ayuda mecánica										
		no son muy liadas ni flexibles								piez. liadas o flexibles	dos personas o ayuda mecánica	
		pesan menos de 2,5 kg				pesan más de 2,5 kg						
coger y manipular		fácil		difícil		fácil		difícil				
α		≤180°	=360°	≤180°	=360°	≤180°	=360°	≤180°	=360°	≤180°	=360°	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		9	2,00	3,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00	5,00	7,00	9,00

Tiempos estimados de inserción y sujeción manuales (en segundos)

Piezas montadas pero no aseguradas									
después de montar		no necesita sujeción				necesita sujeción			
posicionar y alinear		fácil		difícil		fácil		difícil	
resistencia a la inserción		no	sí	no	sí	no	sí	no	sí
		0	1	2	3	6	7	8	9
fácil acceso	0	1,50	2,50	2,50	3,50	5,50	6,50	6,50	7,50
obstruc., mala visión	1	4,00	5,00	5,00	6,00	8,00	9,00	9,00	10,0
obstruc., mala visión	2	5,50	6,50	6,50	7,50	9,50	10,5	10,5	11,5

(1) y (2) representan distintos niveles de severidad en la obstrucción o en la mala visión

Piezas montadas y aseguradas inmediatamente											
		circlips, ecliquetajes		deformación plástica después inserción					atornillado		
				flexión o torsión plástica			remaches o similar				
alinear y posicionar		fácil	difíc.	fácil	difíc.	difíc.	fácil	difíc.	difíc.	fácil	difíc.
resistencia a la inserción		no	sí/no		no	sí		no	sí	no	sí/no
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
fácil acceso	3	2,00	5,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	6,00	8,00
obstruc., mala visión	4	4,50	7,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,5	11,5	8,50	10,5
obstruc., mala visión	5	6,00	9,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,0	13,0	10,0	12,0

(4) y (5) representan distintos niveles de severidad en la obstrucción o en la mala visión

Operaciones sobre piezas montadas											
		procesos mecánicos				procesos no mecánicos			sin fijación		
		sin deform. plástica				proc. metalúrgico					
		doblado y similares	remaches y similares	atornillado y similares	gran deformación plástica	sin material adicional	con material adicional				
							soldadura blanda	soldadura fuerte	adhesivos y pro- cesos químicos	manipulaciones (levantar, ajustar)	otros procesos (llenado líquidos)
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
piezas ya en su sitio	9	4,00	7,00	5,00	12,0	7,00	8,00	12,0	12,0	9,00	12,0

Caso 3.7

Evaluación de la eficiencia de montaje en dos alternativas de cilindro

La Figura 3.14 muestra el despiece de dos alternativas constructivas para un cilindro neumático de baja presión, de carrera corta y con retorno por muelle. La solución de mano derecha es una versión mejorada, especialmente por lo que se refiere al elemento de cierre que incorpora las funciones de tope del pistón y la unión con el cuerpo. Se trata de analizar la *eficiencia de montaje* de estas dos versiones.

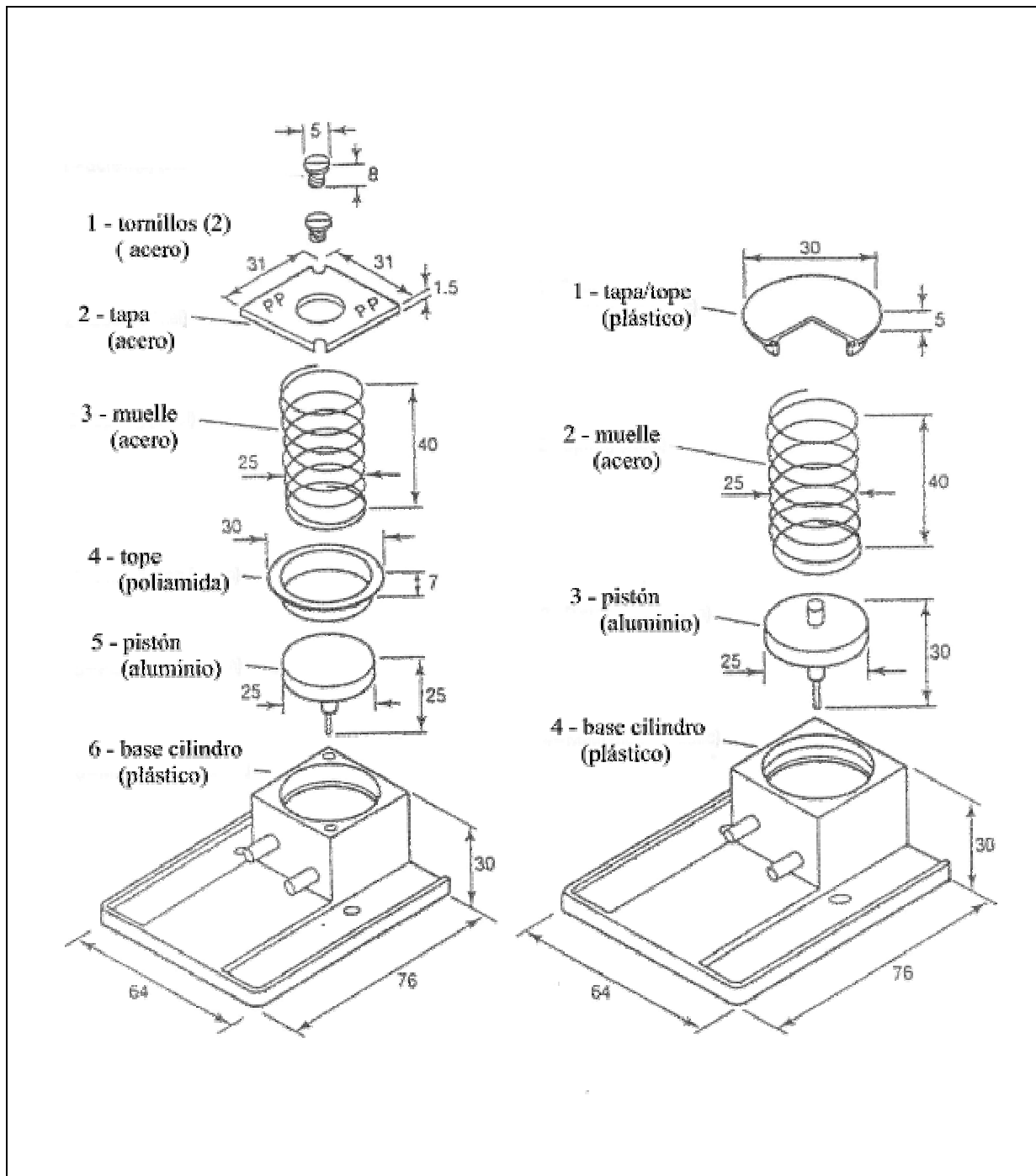


Figura 3.14 Dos soluciones alternativas para un cilindro neumático de baja presión, carrera corta y retorno por muelle: a) Solución original con siete piezas, seis de ellas distintas; b) Nueva solución donde, bajo la perspectiva del *diseño para el montaje*, se han reducido el número de piezas a cuatro.

Tablas comparativas para el cálculo de la eficiencia de montaje
Cilindro neumático original y rediseñado

pistón neumático (original)	1	2	3	4	5	6	7	8
	número de pieza	veces que se ejecuta operación	código de manipulación manual	tiempo de manipulación manual	código de inserción manual	tiempo de inserción manual	tiempo de operación $(2) \times ((4)+(6))$	piezas funcionales
Base	6	1	30	1,95	00	1,50	3,45	1
Pistón	5	1	10	1,50	02	2,50	4,00	1
Tope del pistón	4	1	10	1,50	00	1,50	3,00	1
Muelle	3	1	05	1,84	00	1,50	3,34	1
Tapa	2	1	23	2,36	08	6,50	8,86	0
Tornillo	1	2	11	1,80	39	8,00	19,60	0
Eficiencia de montaje = $=N_{min} \cdot t_a / t_{ma} = 4 \cdot 3 / 42,25 =$	0,29						42,25	4
							t_{ma}	N_{min}

pistón neumático (rediseñado)	1	2	3	4	5	6	7	8
	número de pieza	veces que se ejecuta operación	código de manipulación manual	tiempo de manipulación manual	código de inserción manual	tiempo de inserción manual	tiempo de operación $(2) \times ((4)+(6))$	piezas funcionales
Base	4	1	30	1,95	00	1,5	3,45	1
Pistón	3	1	10	1,50	00	1,5	3,00	1
Muelle	2	1	05	1,84	00	1,5	3,34	1
Tapa con tope	1	1	10	1,50	30	2,0	3,50	1
Eficiencia de montaje = $=N_{min} \cdot t_a / t_{ma} = 4 \cdot 3 / 13,29 =$	0,90						13,29	4
							t_{ma}	N_{min}

Si se calcula el *factor de complejidad*, se obtiene:

Solución original: $N_t = 7; N_t = 6; N_t = 11$, es: $C_f = 7,7$

Solución rediseñada: $N_t = 4; N_t = 4; N_t = 5$, es: $C_f = 4,3$

La mayor distancia entre los valores de la *eficiencia del montaje* respecto a los del *factor de complejidad* se debe a la mayor incidencia de la valoración de las uniones atornilladas en el primero.

3.4 Diseño para la calidad (DFQ)

Calidad y sistema de calidad

La norma ISO 8402 de 1986, referente a la terminología sobre calidad, establece la siguiente definición: *calidad es el conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confiere la aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas.*

En un sentido amplio esta simple definición conduce a un punto de vista globalizador para la empresa que se propone responder a las siguientes preguntas:

1. *¿Aptitud para qué?*

La calidad de un producto o servicio es, en primer término, dar una respuesta adecuada a las necesidades manifestadas o latentes de los usuarios o clientes.

2. *¿Aptitud desde y hasta cuándo?*

La calidad es, también, asegurar el correcto funcionamiento de un producto o servicio en todo su ciclo de vida evitando los defectos de concepto, los fallos de fabricación y las incidencias que se puedan producir durante su utilización.

3. *¿Aptitud a qué precio?*

Y, finalmente, la calidad también incluye administrar y gestionar de forma óptima los recursos, evitando los gastos inútiles (consumos de energía, tiempos muertos, desperdicios de materiales, stocks excesivos)

La calidad implica un conjunto de actitudes nuevas en las empresas que afectan en profundidad a los sistemas de organización y a los métodos de gestión, y que pueden resumirse en:

1. Hacer el trabajo bien desde el principio y una sola vez
2. Evitar o reducir costes inútiles
3. Realizar una acción preventiva, anticiparse a los fallos, a los gastos inútiles

Sin embargo, más allá de atender la calidad individual de cada uno de los productos y servicios, las empresas deben establecer las condiciones y los medios para que la calidad sea un hecho habitual.

Aunque podrían darse situaciones límite en la cual una empresa fabrica productos de gran calidad en un contexto desorganizado y caótico u, otra empresa, fabrica productos de baja calidad en una organización modélica, el hecho es que la calidad de los productos y servicios suele ir asociada a una buena organización con procedimientos, metodologías y herramientas adecuadas. El objetivo de un *sistema de calidad* es asegurar estos últimos aspectos.

Sistema de gestión de la calidad

Un *sistema de gestión de la calidad* tiene per objeto definir *cómo* debe obtenerse la calidad (sin entrar en *qué* hay que hacer para obtenerla) y, por lo tanto, afecta a todo tipo de empresa de productos y de servicios. La norma ISO 8402:1986 define un sistema de gestión de la calidad como el conjunto de la estructura, la organización, las responsabilidades, los procedimientos, los procesos y los recursos que establece una empresa para realizar la gestión de la calidad. Consta de dos partes:

1. La creación de un proyecto que debe incluir un análisis de la situación, el diseño de la organización, los procedimientos, las instrucciones y la documentación técnica necesaria para redactar los documentos requeridos por las normas.
2. Y, la aplicación práctica del sistema de calidad que debe incluir unos medios materiales (locales, instalaciones, máquinas, instrumentos) y unos recursos humanos (conocimiento de las responsabilidades, entrenamiento, formación)

Las normas ISO 9000 (aseguramiento de la calidad en las empresas), estructuradas en varias partes (ISO 9001 para empresas con actividades desde el diseño hasta la posventa; ISO 9002 para empresas que se centran en la fabricación; ISO 9003 para empresas que debían demostrar la capacidad para inspeccionar y ensayar los productos), fueron aprobadas per primera vez en el año 1987, revisadas en el 1994 y se han aplicado a numerosas industrias.

Sin embargo, las nuevas normas ISO 9000 del 2000 sobre *gestión de la calidad* (más de una docena) establecen un cambio de punto de vista respecto a las ediciones anteriores y ponen el énfasis en la orientación hacia el cliente, la gestión por procesos y la mejora continua (lo que, entre otras cosas, hace que se integren mejor con las normas ISO 14000 sobre el medio ambiente). La norma ISO 9001:2000 (*Sistemas de gestión de la calidad – Principios esenciales y vocabulario*) presenta los siguientes apartados (en el 7 también se describen los subapartados):

1. Objeto y campo de aplicación
2. Referencias normativas
3. Términos y definiciones
4. Sistema de gestión de la calidad
5. Responsabilidad de la dirección
6. Gestión de los recursos
7. Realización del producto
 - 7.1 Planificación de la realización del producto
 - 7.2 Procesos relacionados con el cliente
 - 7.3 Diseño y desarrollo
 - 7.4 Compras
 - 7.5 Producción
8. Medida, análisis y mejora

A continuación se describe el contenido de los subapartados 7.1, 7.2 y 7.3 ya que son los que se relacionan más con el objeto de este texto:

7.1 *Planificación de la realización del producto*

En la planificación de la realización del producto hay que establecer por avanzado la planificación de la calidad según las etapas: subproceso de planificación y definición del programa; subproceso de diseño y desarrollo del producto; subproceso de diseño y desarrollo del proceso productivo; Subproceso de validación del producto y proceso; Subproceso de retroacción, evaluaciones y acciones correctoras.

7.2 *Procesos relacionados con el cliente*

7.2.1 *Determinación de los requisitos relacionados con el producto*

Los requisitos técnicos, de servicio y económicos pedidos y acordados con el cliente deben documentarse en ofertas, pedidos o contratos. La empresa debe documentar las características técnicas, de uso, reglamentarias, legales de los productos, en especificaciones técnicas, catálogos, etc. que se comunican a los clientes.

7.2.2 *Revisión de los requisitos relacionados con el producto*

Previo a la presentación de una oferta o a la aceptación de un pedido o un contrato, la empresa debe hacer una revisión técnica, económica, de entrega y de asistencia posventa y deben establecerse las responsabilidades y competencias para llevar a término esta revisión en el seno de la empresa.

7.2.3 *Comunicación con el cliente*

La empresa debe establecer la forma eficaz de comunicarse con los clientes en relación a informaciones sobre productos, consultas, contratos o pedidos, modificaciones, así como las reclamaciones, necesidades y grado de satisfacción.

7.3 *Diseño y desarrollo*

7.3.1 *Planificación.* La empresa debe planificar y controlar el diseño y desarrollo del producto. En concreto, debe determinar las responsabilidades y las etapas, así como los procedimientos de verificación, validación y, eventualmente, de revisión.

7.3.2 *Entradas al diseño.* Hay que definir y documentar los requisitos de entrada relacionados con el producto (funcionales y de rendimiento, legislación y reglamentación, información aplicable de diseños anteriores y otros requisitos esenciales). Las modificaciones deben ser aprobadas por los responsables y comunicadas al equipo de diseño y, en su caso, a los clientes.

7.3.3 *Resultados.* Hay que documentar y aprobar los resultados del diseño y desarrollo a fin de comprobar si satisfacen los requisitos de entrada, servir de referencia para los criterios de aceptación del producto, definir los criterios esenciales para utilizarlo de forma segura y apropiada y como fuente de información para las operaciones de compra, producción y de servicio.

7.3.4 *Revisión*. Hay que realizar (y documentar) revisiones sistemáticas del diseño y desarrollo donde participen representantes de las funciones correspondientes, como mínimo en las fases de identificación de los requisitos del cliente, de establecimiento de las entradas y resultados del diseño y de la realización del producto.

7.3.5 *Verificación*. Deben realizarse verificaciones del diseño y desarrollo (cálculos alternativos, simulaciones, ensayos, comparaciones con productos análogos) para asegurar que los resultados cumplen la especificación de entrada, registrarlos y, en caso de discrepancias, establecer y documentar las acciones a tomar.

7.3.6 *Validación*. Antes de la entrega o la implantación del producto, debe validarse el diseño y desarrollo a través de simulaciones virtuales, de ensayos de los prototipos en el laboratorio, de pruebas en condiciones operativas o de validaciones de uso por parte de los clientes para confirmar que cumple el uso previsto. En caso de discrepar con lo esperado, se documenta y se toman las decisiones para corregirlo.

7.3.7 *Control de los cambios*. Hay que identificar, documentar y controlar cualquier cambio en el diseño y desarrollo, así como sus efectos sobre los componentes y productos. Es conveniente que los cambios sean verificados, validados y aprobados antes de su implantación.

Evolución de la calidad

Se pueden esbozar las siguientes etapas de la aún corta historia de la calidad (las últimas décadas han visto un gran volumen de actividades y de bibliografía):

1. *Control de calidad (QC)*. Detecta los defectos de fabricación y los elimina antes de que los productos o servicios lleguen al usuario. Resuelve, pues, la calidad del pasado
2. *Control estadístico de procesos (SPC, statistical process control)*. Asegura la calidad del presente
3. *Gestión de la calidad total (TQM, total quality management)*. A partir de nuevas concepciones y metodologías, pone las bases para la calidad del futuro.

La *calidad en línea (on-line quality)* tiene lugar durante o después de la producción y corresponde a técnicas y metodologías para determinar si hay que tomar o no una acción correctora. Corresponde al *control de calidad*, que se traduce en acciones de aceptación o rechazo de piezas y componentes ya fabricados (o su eventual recuperación), y también al *control estadístico de procesos*, conjunto de técnicas destinadas a corregir en el presente los parámetros del proceso de fabricación.

La *calidad fuera de línea (off-line quality)* se refiere a las acciones que se realizan durante el proceso de diseño del producto o servicio (o de sus medios de producción) y cuyo objetivo esencial es asegurar la calidad futura. Es el punto de vista de las nuevas técnicas y metodologías del *diseño para la calidad* cuyas actividades recaen fundamentalmente en las etapas de definición y concepción.

Calidad a través del diseño

Esta es una nueva perspectiva de la *ingeniería concurrente* que incorpora la consideración de los requerimientos de calidad desde la etapa de diseño lo que presenta los siguientes puntos de interés:

1. Asegura que el producto o servicio responda a los requerimientos y necesidades de los usuarios
2. Establece criterios, parámetros y tolerancias adecuados para una fabricación y un funcionamiento *robusto* del producto (poco sensibles a perturbaciones)
3. Concibe los productos para que los procesos de fabricación y montaje faciliten una producción sin errores y con los mínimos costes e incidencias
4. Asegura que el producto o servicio funcione sin fallos durante su utilización o, en caso necesario, que su mantenimiento y reparación sean los adecuados.

Si un diseño no tiene en cuenta los objetivos de la calidad, es difícil que en etapas posteriores (fabricación, comercialización, utilización) se pueda corregir eficazmente sus consecuencias negativas.

Tradicionalmente, se han usado determinadas herramientas clásicas para asegurar la calidad del futuro, como los cálculos de fatiga de elementos sometidos a sollicitaciones dinámicas o los ensayos de durabilidad de piezas y componentes, destinados a asegurar la *fiabilidad* del producto. Sin embargo, en tiempos más recientes han surgido nuevos métodos y ayudas al diseño que se basan en la concepción más global de la calidad descrita al inicio de esta sección. Entre ellos se destacan y se describen los tres siguientes:

- a) *Desarrollo de la función de calidad (QFD, quality functional deployment)*
Es un método globalizador cuyo objetivo principal es asegurar que se tiene en cuenta la voz del usuario o cliente, a la vez que constituye una ayuda para la planificación de la *calidad* durante todo el ciclo de vida.
- b) *Diseño de experimentos (DOE, design of experiments)*
Metodologías para adquirir un mayor conocimiento de un sistema o proceso en base a realizar un número reducido de experimentos. G. Taguchi [Tag 1986, Tag 1989] introdujo el concepto de *robustez* (insensibilidad en el funcionamiento de un sistema o proceso ante variaciones intrínsecas y extrínsecas) y proporcionó técnicas para conseguirlo.
- c) *Análisis de modos de fallo y sus efectos (AMFE)*
(FMEA, *failure modes and effects analysis*, MIL-STD 16291)
Herramienta de predicción, prevención y mejora (aplicable a diversos niveles: producto, proceso, medios de producción, planificación del mantenimiento) que, a partir del análisis de los posibles modos de fallo, analiza sus causas, efectos y su criticidad para proponer mejoras.

Desarrollo de la función de calidad, QFD

Introducción y definiciones

Como ya se ha dicho, el *desarrollo de la función de calidad* QFD (*quality function deployment*) es un método globalizador cuyo objetivo principal es asegurar que en la definición de un producto o servicio se han considerado las necesidades y requerimientos de los usuarios (o, la *voz del usuario*), a la vez que también constituye una herramienta para la planificación de la *calidad* durante el ciclo de vida. Consiste en un proceso estructurado que permite traducir los requerimientos y deseos de los usuarios en requerimientos técnicos de ingeniería en cada fase del diseño y de la fabricación.

Fue introducido por primera vez en Japón en el año 1972, e inmediatamente tuvo una gran aceptación en este país; más tarde, en 1983 fue introducido en EE.UU. de la mano de Yoji Akao, y hoy día se utiliza en numerosas empresas de los países desarrollados y en vías de desarrollo.

Es un método que presupone el establecimiento de un *equipo pluridisciplinario* orientado al *consenso*, basado en *aproximaciones creativas* y que permite la síntesis de nuevas ideas de una *manera estructurada*.

Las 4 fases

Yoji Akao definió una serie de matrices para guiar el proceso del *desarrollo de la función de calidad*. Cada fase del desarrollo de un producto (planificación del producto, despliegue de componentes, planificación del proceso y planificación de la producción) se representa por una matriz cuyas *características* de diseño aportan las *especificaciones* de entrada a la matriz siguiente, en una secuencia en forma de una cascada de cuatro saltos (Figura 3.15):

- a) *Planificación del producto (o casa de la calidad)*
Traduce las *demandas de los clientes* en *características técnicas del producto*
- b) *Despliegue de componentes*
Traduce las *especificaciones del producto* (o *características técnicas* de la matriz anterior) en *características de los componentes*
- c) *Planificación del proceso*
Traduce las *especificaciones de los componentes* (o *características de los componentes* de la matriz anterior) en *características del proceso de fabricación*
- d) *Planificación de la producción*
Traduce las *especificaciones del proceso* (o *características del proceso de fabricación* de la matriz anterior) en *procedimientos de planificación de la producción*.

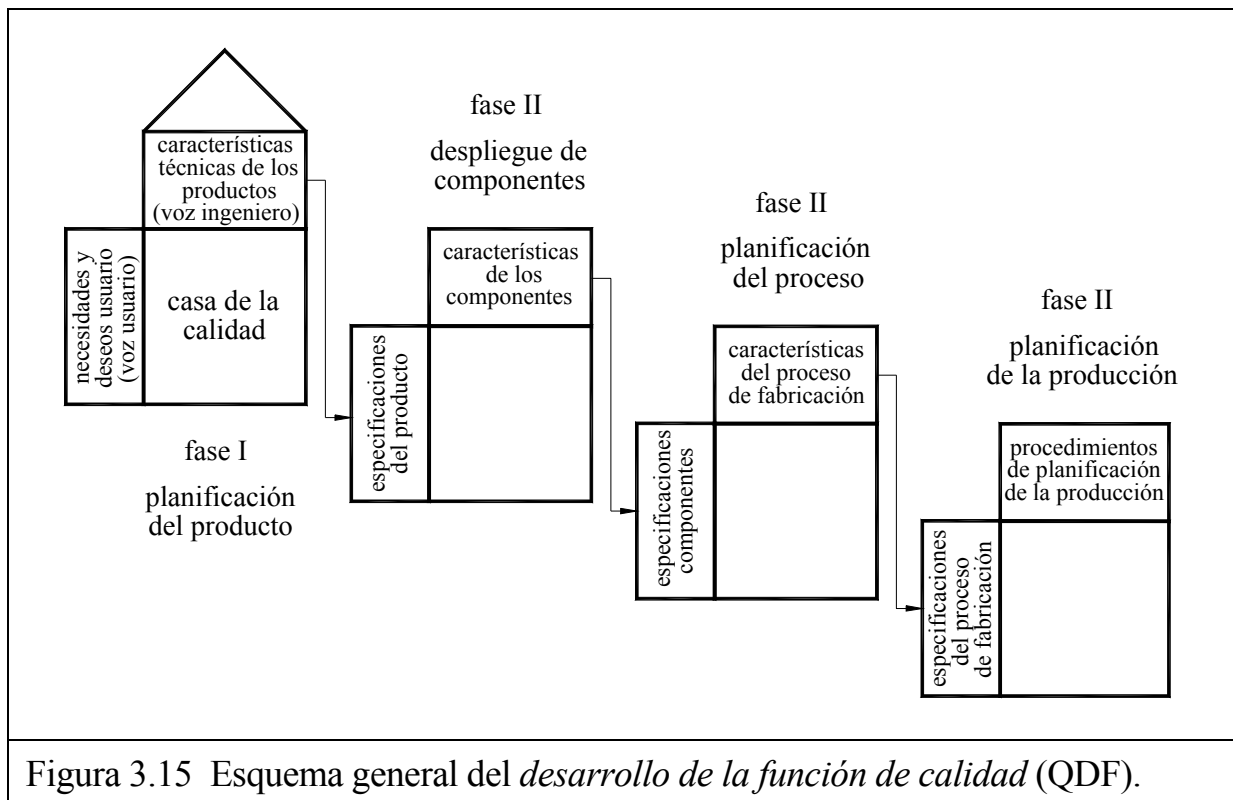


Figura 3.15 Esquema general del *desarrollo de la función de calidad* (QDF).

La casa de la calidad

La primera de estas matrices (o *casa de la calidad*; ver Figuras 3.15 y 3.16), traduce las *demandas* de los usuarios (o *voz del cliente*) en *requerimientos técnicos del producto*. Es la de aplicación más frecuente y en ella se distinguen 6 pasos:

1. *Voz del usuario*
Describe las *demandas* (*requerimientos y deseos*) de los usuarios
2. *Análisis de competitividad*
Describe, según el usuario, el grado de satisfacción que proporcionan los productos o servicios de la empresa respecto a los de la competencia
3. *Voz del ingeniero*
Describe los requerimientos técnicos que deberán articularse para satisfacer las necesidades de los usuarios
4. *Correlaciones*
Establece las correlaciones entre la voz de los usuarios y la voz del ingeniero
5. *Comparación técnica*
Compara el producto de la empresa con los de la competencia
6. *Compromisos técnicos*
Establece los *compromisos* potenciales entre las diferentes características técnicas del producto

Paso 1. La voz del usuario

En el *desarrollo de la función de calidad*, las *demandas de los clientes* (*requerimientos* y *deseos*) constituyen el elemento conductor de todo el proceso de diseño de un nuevo producto o servicio. El primer paso consiste, pues, en pedir a un grupo representativo de usuarios (en su sentido más amplio: distribuidores, vendedores, usuarios finales) cuáles son sus requerimientos y deseos. Una de las formas más frecuentes de hacerlo es a través del *diagrama de afinidad*. Se procede de la siguiente forma:

Se realiza un *brainstorming* (o lluvia de ideas) entre un grupo de clientes en relación a todos sus requerimientos y deseos sobre el nuevo producto, aunque sean expresados de forma vaga, incompleta y con redundancias

Por medio de un experto en el método QFD los requerimientos y deseos de los usuarios son formulados de forma precisa y útil como entradas al sistema.

Todas las demandas deben tener un mismo nivel de detalle; si la lista resulta demasiado larga (lo que sucede con frecuencia), deben agruparse las demandas bajo títulos más generales hasta identificar un máximo entre 20 y 30 categorías. Según la percepción que el usuario tiene de ellas, estas demandas se clasifican en:

1. *Demandas básicas*

A menudo no son formuladas por los usuarios ya que se consideran obvias; sin embargo cuando no se cumplen, el usuario manifiesta insatisfacción

2. *Demandas unidimensionales*

Con su mejora aumenta proporcionalmente la satisfacción de los usuarios

3. *Demandas estimulantes*

Estas características complacen al usuario y diferencian un producto de otro. En caso de no darse, no producen insatisfacción en el usuario

Con el tiempo, las *demandas estimulantes* se convierten en *unidireccionales* y éstas últimas en *básicas*.

Paso 2. Análisis de la competencia

A continuación, hay que plantear al grupo de usuarios las tres preguntas siguientes sobre el análisis de la competencia en relación con cada demanda:

- a) ¿Qué importancia tiene para usted su cumplimiento?
- b) ¿En qué grado los productos de la empresa la cumplen?
- c) ¿En qué grado los productos de la competencia la cumplen?

Una vez obtenidas estas respuestas (evaluadas generalmente de 1 a 5), los datos se compilan y los resultados se introducen en la *casa de la calidad*:

Columna A: evaluación del cumplimiento del producto de la empresa
 Columnas B y C: evaluación del cumplimiento de los productos de la competencia

A partir del análisis de la competencia la empresa establece unos *objetivos* a cumplir (columna D) en relación a las *demandas de* los clientes, así como un *índice de mejora* (columna E) que indica el grado de mejora que la empresa se propone para cada *demanda*. También se hace un especial énfasis en las *demandas* que se consideran puntos fuertes en la venta o *factor de venta* (columna F) y en la *importancia* (columna G) evaluada por los usuarios:

Columna D: *Objetivos* (fijación del nivel deseado, de 1 a 5)
 Columna E: *Índice de mejora* ($E = D/A \geq 1$)
 Columna F: *Factor de venta* (evaluación en niveles de 1/1,2/1,5)
 Columna G: *Importancia* (a partir de respuestas de los usuarios, de 1 a 5)

Finalmente se establece una *ponderación* (columna H), y una *ponderación porcentual* (columna I) para cada una de las *demandas* del cliente:

Columna H: *Ponderación* ($H=E \cdot F \cdot G$)
 Columna I: *Ponderación porcentual* (en % sobre el total de las demandas)

Paso 3. La voz del ingeniero

El reto más importante en la construcción de la *casa de la calidad* es la traducción de las *demandas* subjetivas de los clientes en *características técnicas* objetivas del producto, lo que constituye la *voz del ingeniero*.

Para realizar este paso el equipo de diseño debe crear una lista de *características técnicas* (medibles, al alcance de la empresa) que puedan dar cumplimiento a las *demandas*. Como mínimo para cada *demanda* se debe identificar una *característica técnica*. De forma análoga a las *demandas de* los clientes, su número máximo debe situarse entre 20 y 30.

Paso 4. Correlaciones

El cuerpo de la *casa de la calidad* muestra las capacidades de cada *característica técnica* para satisfacer al cliente en cada una de las *demandas*. En este paso hay que formularse la siguiente pregunta:

¿Hasta qué punto se podrá predecir que se van a satisfacer las *demandas* a partir de las *características técnicas* elegidas?

El resultado de esta pregunta debe obtenerse por consenso del equipo de diseño y se establece en tres niveles: *fuerte*, *mediano* y *débil* (simbolizados por un círculo con punto, un círculo y un triángulo, respectivamente y, si no existe relación, el espacio se deja en blanco). Este trabajo de evaluación establece un lenguaje común entre los miembros del equipo de diseño y fomenta las comunicaciones entre los departamentos durante todo el proyecto.

Paso 5. Evaluación técnica

Este paso se realiza después de haber completado el cuadro de correlaciones del paso anterior y consiste en la evaluación de la incidencia de cada una de las *características técnicas* en la satisfacción de las demandas del usuario.

Para ello, el equipo de diseño calcula la *incidencia* de cada *característica técnica* en base al sumatorio de productos de los *factores de incidencia*, I_d , función de cada correlación (fuerte=9; mediana=3; débil=1; ver Figura 3.16), por el correspondiente valor de la *ponderación*, S_{dt} , (columna H de la Figura 3.16):

$$\text{Importancia } t = \sum I_d \cdot S_{dt}$$

Importancia porcentual (en forma de % sobre el total de características técnicas)

Normalmente, se señalan unas pocas *características técnicas* para ser mejoradas, en función del valor de la *importancia* y de la posición en la evaluación técnica.

Paso 6. Compromisos técnicos

El techo de la *casa de la calidad* contiene los distintos *compromisos* entre las *características técnicas* del producto que la empresa debe sopesar y decidir para situarse lo mejor posible en el mercado. Se han establecido cuatro niveles de correlación con sus símbolos: *muy negativa*, *negativa*, *positiva* y *muy positiva*.

Previamente, los miembros del equipo de diseño deben haber establecido un diseño conceptual básico por medio de técnicas de ingeniería concurrente. Pueden darse varios casos de interacción entre características técnica:

a) *Correlación positiva*

Al mejorar una *característica técnica*, también mejora la otra

b) *Correlación negativa*

Al mejorar una *característica técnica*, empeora la otra

c) *Sin correlación*

Las variaciones de dos *características técnicas* no tienen influencia mutua

Implantación del QFD

La implantación del *desarrollo de la función de calidad* no es una tarea simple e involucra una serie de factores tales como la cultura de la empresa y la confianza con la mejora continua. Es una metodología que exige una gestión participativa presidida por el impulso y la confianza de la dirección general. Hay que informar a todo el personal de los objetivos del QFD y convencerlo de que el trabajo adicional de documentación y de recogida de datos que comporta es beneficioso.

En otro orden de cosas, la implantación del *desarrollo de la función de calidad* suele ser más simple si se aplica inicialmente a la mejora de un producto conocido. Más adelante se estará en condiciones de abordar el diseño de nuevos productos.

Entre los beneficios de la implantación del QFD se encuentran los siguientes:

- Define de forma muy consistente el producto
- Acorta los plazos de desarrollo
- Acumula conocimiento
- Requiere pocos cambios durante el desarrollo
- Mejora la relación entre departamentos de la empresa
- Elimina procesos que no añaden valor
- Identifica procesos que requieren mejoras
- Genera una documentación mucho más accesible
- Descubre nichos de mercado
- Facilita los cambios rápidos
- Aumenta la productividad
- Elimina reclamaciones de los usuarios

Caso 3.8

Definición de un fogón de camping

Se plantea el siguiente escenario a un grupo de clientes: "En una excursión de fin de semana a un paraje no habitado, en la que hay que cargar con todo el equipo a cuestas, se necesita un fogón para cocer la comida en un lugar donde no está permitido hacer fuego. ¿Qué se requiere y qué se desea de este fogón?"

Pasos 1 y 2

Un vez recogida la información de un grupo de usuarios y agrupada por medio del *diagrama de afinidad*, se obtiene la siguiente lista de *demandas*:

1. Que sea muy compacto
2. Que sea muy ligero
3. Que se encienda fácilmente
4. Que sea muy estable (no vuelque)
5. Que funcione silenciosamente
6. Que caliente rápidamente
7. Que no requiera mantenimiento
8. Que pueda cocer a fuego lento
9. Que pueda estar encendido durante mucho tiempo
10. Que el depósito sea rellenable
11. Que sea fácil de obtener el gas combustible

Dado que el grupo de clientes no ha hecho ninguna indicación sobre cuáles de estas demandas son básicas, unidimensionales o estimulantes, corresponde al equipo de diseño de arriesgarse a hacerlo.

El resultado es:

<i>Demandas básicas:</i>	4, 10, 11
<i>Demandas unidimensionales:</i>	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9
<i>Demandas estimulantes:</i>	2

A continuación, se realiza el análisis de la competencia (columnas de A hasta I, Figura 3.16). El resultado indica que hay que concentrar los esfuerzos en cuatro puntos que concentran el 65% de las mejoras y que en orden de importancia son: *depósito rellenable, tiempo de funcionamiento, poder cocer a fuego lento y mejorar la ligereza.*

Pasos 3, 4 y 5

El grupo de diseño crea la siguiente lista de *características técnicas* que constituyen la voz del ingeniero:

1. Volumen	m ³
2. Peso	kg
3. Tiempo de encendido en aire quieto a 0°	s
4. Nivel de ruido	dB
5. Tiempo para hervir agua a 20° C con olla tapada, nivel del mar	min
6. Capacidad del depósito	m ³
7. Tiempo de combustión a llama máxima	min
8. Agua hervida por unidad de gas	kg/m ³
9. Número de recargas por depósito	(-)
10. Número de puntos de recarga en el mundo	(-)

Al rellenar la tabla de correlaciones los ingenieros se encuentran con la sorpresa de que no hay ninguna *característica técnica* para medir "cocer a fuego lento". Se hacen consultas y finalmente se decide añadir una nueva característica técnica a las establecidas en el paso 3:

12. Máximo tiempo de ebullición con la mínima llama

Hay aún otros dos puntos débiles en la matriz de correlación: no existen características técnicas para medir las demandas de *que sea muy estable* y de *que no requiera mantenimiento*. Habían pasado desapercibidos pero tampoco habían dado problemas posteriores.

Luego se decide evaluar la incidencia de las características técnicas en la mejora del producto de la que se desprende que 6 de ellas tienen incidencias significativas (81% del total) siendo las dos más destacadas: *número de recargas por depósito* y *tiempo de combustión a llama máxima*.

Paso 6

El grupo de diseño establece los compromisos entre características técnicas. De ellas se desprenden, por ejemplo, que aumentando la *capacidad del depósito*, aumenta también el *tiempo de combustión a llama máxima* (correlación positiva), mientras que empeora el *nivel de ruido* (correlación negativa).

Diseño de experimentos (DOE, *design of experiments*)

Introducción

Uno de los objetivos del diseño es conseguir que determinados parámetros o características relacionadas con la calidad de los productos y de los procesos sean óptimos. En unos casos, se desean los valores más grandes posibles (por ejemplo, el número de monedas procesadas por unidad de tiempo en una máquina universal de clasificar monedas; Figura 15.10); en otros casos, se desean los valores más pequeños posibles (por ejemplo, limitar al mínimo el movimiento del grupo flotante de una lavadora-centrifugadora durante el centrifugado; Figura 15.6 y Ejemplo 17.2); y, en un tercer tipo de casos, se desean los valores más próximos a una determinada referencia (por ejemplo, la posición donde el elevador-volteador de una unidad de recogida de basura devuelve automáticamente el contenedor después de vaciarlo; Figura 15.11).

Los valores de estas características de calidad dependen de variables que pueden ser cuantitativas (longitudes, velocidades, temperaturas, tensiones) o cualitativas (materiales, disposiciones, abierto-cerrado). El diseñador controla algunas de ellas (dimensiones de las piezas, temperatura del proceso, tensión eléctrica) mientras que, otras, dependen de la producción, el entorno o la utilización (tolerancias de fabricación, temperatura ambiente, acciones del usuario, bajadas de tensión).

En general, las relaciones entre las características de calidad de los productos y procesos y los factores que les afectan son mal comprendidas ya que, o bien no responden a leyes conocidas de la ciencia y de la técnica (o son insuficientes para explicar la complejidad de la realidad), o bien el conocimiento que las empresas tienen de ellas se basa en una experiencia adquirida a lo largo del tiempo de forma intuitiva y poco metódica.

Experimentar es cambiar deliberadamente las condiciones de funcionamiento de los sistemas para mejorar el conocimiento de los productos y procesos y, a la vez, orientar las acciones a tomar en el diseño y desarrollo. El objetivo básico del *diseño de experimentos*, basado en técnicas y metodologías estadísticas, consiste en determinar el conjunto de pruebas a realizar para obtener el máximo conocimiento útil sobre el sistema con el mínimo número (y, por lo tanto, coste) de experimentos.

El *diseño de experimentos* tiene su precedente en los estudios de R. Fisher y las aplicaciones a la agronomía a partir de los años 1930, pero prácticamente no trascendió al campo de la ingeniería hasta mucho más tarde (hacia los años 1970 en el Japón y los años 1980 en EUA y Europa) cuando los trabajos de G. Taguchi [Tag, 1986] pusieron el énfasis en el concepto de *diseño robusto*, poco sensible a las variaciones.

Confluyendo con la estrategia de la ingeniería concurrente, el *diseño de experimentos* parte de la idea de que el mejor momento para poner las bases de la calidad de los productos y procesos es durante sus etapas de especificación y concepción.

Estrategias de experimentación

Experimentar consiste en realizar una serie de pruebas para conocer mejor la evolución de las características de calidad de un sistema.

Cualquier estrategia de experimentación debe realizar los siguientes pasos: *a)* Comienza con un análisis del sistema para determinar las características de calidad (o *respuestas*) de interés, las variables (o *factores*) que inciden de forma significativa en cada una de ellas, así como el número de valores (o *niveles*) que conviene que tomen estas variables; *d)* Después, establece el número de experimentos y las combinaciones de niveles de los factores en cada uno de ellos (*matriz de diseño*); *d)* Finalmente, a partir de la interpretación de los resultados, establece criterios y calcula valores de los factores para obtener una respuesta óptima.

En determinadas estrategias de experimentación se decide inicialmente el conjunto de pruebas a realizar (por la totalidad del presupuesto) mientras que, en otras estrategias llamadas secuenciales, se reserva una parte de las pruebas para después de conocer los resultados de los primeros experimentos. Esta segunda estrategia suele proporcionar resultados más fiables o requiere un menor número de experimentos, pero puede ser inviable cuando las condiciones de las pruebas son difícilmente reproducibles.

A continuación se describen brevemente algunas de las estrategias de experimentación más conocidas:

Experimentar sin planificar

Probablemente es la más utilizada. Se basa en el conocimiento previo que tienen las empresas de los sistemas y procesos sobre los que se desea experimentar y depende de la pericia e intuición de las personas que los realizan. Puede ser muy larga, de resultados inciertos y antieconómica.

Experimentar factor a factor

Es un método secuencial que se basa en aislar el efecto de cada uno de los factores y consiste en partir del valor más beneficioso del factor anterior antes de considerar la variación de un nuevo factor. La gran ventaja de este método es que requiere pocos experimentos, pero puede dar lugar a resultados erróneos cuando las interacciones (el hecho de que la respuesta a las variaciones de un factor depende del nivel de otro factor) son importantes, ya que no las tiene en cuenta.

En el Ejemplo 17.2, donde se desea minimizar la respuesta, esta estrategia recorrería secuencialmente los cuatro experimentos 1, 2, 3 y 7; dado que en este caso las interacciones no son significativas, el resultado es correcto.

Diseño de experimentos factorial completo

Es un diseño de experimentos que considera todas las posibles combinaciones de niveles de los factores en la experimentación. Tiene la ventaja que permite analizar no tan solo los efectos principales, sino también sus interacciones, pero presenta la desventaja de requerir un número de experimentos relativamente elevado, sobre todo cuando el número de factores a considerar aumenta.

En los diseños de experimentos factoriales más frecuentes, la *respuesta* depende de k factores que toman valores a tan solo dos niveles (indicados por +1 y -1; o, simplemente, por + y -). El número de experimentos es, pues, la potencia 2^k .

Se establece la matriz de diseño en base a alternar los niveles - y + del primer factor en la primera columna, 2 niveles - y 2 niveles + del segundo factor en la segunda columna, 4 niveles - y 4 niveles + del tercer factor en la tercera columna, y así sucesivamente. La respuesta óptima (la mayor, la menor, la más ajustada) entre los experimentos realizados constituye una primera solución del problema.

Mediante el algoritmo de Yates se obtienen los efectos principales entre factores y sus interacciones (ver el caso de aplicación del Ejemplo 17.2). A partir de los efectos y de los factores cuantitativos convenientemente codificados, se puede establecer un modelo polinomial sin términos cuadráticos que permitir hallar óptimos más allá de los obtenidos directamente por los experimentos. En este diseño de experimentos a dos niveles no conviene alejarse del campo de experimentación.

Diseño de experimentos factorial fraccional

El principal inconveniente de un diseño factorial completo es que requiere un número elevado de experimentos que crece exponencialmente con los factores considerados y, a su vez, proporciona una información excesiva sobre las interacciones. Por ejemplo, un diseño con 5 factores requiere 32 experimentos y se obtienen 5 efectos principales, 10 interacciones de 2 factores, 10 de tres factores, 5 de 4 factores y 1 de los 5 factores.

Dado que son muy raras las interacciones significativas de 3 o más factores, los *diseños factoriales fraccionales* reducen el número de experimentos a costa de eliminar información sobre las interacciones superiores. En efecto, si se eligen convenientemente la mitad de los 32 experimentos de un diseño factorial completo de 5 variables (siguiendo una matriz de diseño de cuatro factores con una nueva columna añadida para el quinto factor con los niveles que resultan de multiplicar los signos de las cuatro columnas anteriores), se pueden obtener los 5 efectos principales y las 10 interacciones de 2 factores (*diseño factorial fraccional* 2^{5-1}).

El proceso de fraccionamiento (contracción de los experimentos con pérdida de información) se puede llevar a término hasta que sólo quedan los efectos principales y, entonces, se llaman *diseños saturados* (3 variables en 4 experimentos; 7 variables en 8 experimentos; 15 variables en 16 experimentos) y sus matrices son las utilizadas por G. Taguchi en su metodología de diseños robustos.

Ejemplo: 17.2

Diseño de experimentos para el desequilibrio de una lavadora-centrifugadora

El desequilibrio de la ropa en una lavadora-centrifugadora es un fenómeno intrínseco al mismo proceso de centrifugado. Un de los aspectos más importantes es la limitación del movimiento del grupo flotante al pasar por la velocidad de resonancia, ya que amplitudes excesivamente grandes pueden originar golpes con las tapas exteriores e incluso saltos y desplazamientos de la máquina.

Se propone un diseño de experimentos factorial completo tomando como *respuesta* la amplitud máxima de movimiento (Y , en milímetros pico a pico) y tres *factores* a dos niveles: X_S , suspensión formada por el conjunto muelle- amortiguador (blanda, $-$, y dura, $+$); X_A , aceleración del movimiento (baja, $-$, y alta, $+$); y X_M , masa del grupo flotante (pequeña, $-$, y grande, $+$). Los resultados (imaginados pero posibles) de los experimentos son:

	Matriz de diseño			Resp.	Columnas auxiliares			División	Efectos	Identific.
	X_S	X_A	X_M	Y	(1)	(2)	(3)			
1	$-$	$-$	$-$	38,1	79,9	138,0	247,6	/8	30,95	Media
2	$+$	$-$	$-$	41,8	58,1	109,6	10,0	/4	2,50	X_S
3	$-$	$+$	$-$	27,9	65,8	6,0	-43,8	/4	-10,95	X_A
4	$+$	$+$	$-$	30,2	43,8	4,0	-2,2	/4	-0,55	$X_S X_A$
5	$-$	$-$	$+$	31,7	3,7	-21,8	-28,4	/4	-7,10	X_M
6	$+$	$-$	$+$	34,1	2,3	-22,0	-2,0	/4	-0,50	$X_S X_M$
7	$-$	$+$	$+$	21,1	2,4	-1,4	-0,2	/4	-0,05	$X_A X_M$
8	$+$	$+$	$+$	22,7	1,6	-0,8	0,6	/4	0,15	$X_S X_A X_M$

Dado que se desea minimizar la respuesta Y (cuanto más pequeña es la amplitud del movimiento, mejor), la solución óptima corresponde al experimento 7: nivel bajo del factor X_S (suspensión blanda), y niveles altos de los factores X_A (aceleración alta del movimiento) y X_M (masa grande del grupo flotante).

Para obtener un mejor conocimiento de los efectos y las interacciones de los factores sobre la respuesta se aplica el algoritmo de Yates (verlo con mayor extensión en [Pra, 1997]): 1) Detrás de la columna de respuestas se añaden tantas columnas auxiliares como factores. 2) La primera mitad de los términos de la primera columna auxiliar son las sumas de las respuestas ($1a+2a$, $3a+4a$, etc.) y la segunda mitad son las diferencias ($2a-1a$, $4a-3a$, etc.). 3) Las columnas auxiliares siguientes se obtienen de forma análoga a partir de los valores de la columna anterior. 4) Se crea una columna de efectos dividiendo el primer valor de la última columna auxiliar por el número de condiciones experimentales y, los restantes valores, por la mitad de estas condiciones. 5) El primer valor de la columna de efectos es la media de las respuestas mientras que los restantes valores corresponden a los efectos principales o a las interacciones (siguiendo los signos $+$ en la matriz de diseño).

Los efectos dependen de la variabilidad de los experimentos y son necesarios criterios y métodos [Pra, 1997] para discernir cuando los valores son significativos. En el ejemplo anterior resultan significativos los efectos de los factores X_A y X_M y habría que comprobar si lo es el efecto del factor X_S , mientras que ninguna de las interacciones son significativas. Cuando los niveles son cuantificables, se puede establecer un modelo matemático a partir de la media y de los efectos significativos que puede permitir obtener un óptimo mejor que el de los experimentos.

El concepto de producto robusto de G. Taguchi

Las metodologías de diseño de experimentos presentadas en los apartados anteriores permiten analizar los factores que afectan a una determinada característica de calidad y fijar los niveles que la optimizan. Sin embargo, muchas de las características de calidad están afectadas por factores que difícilmente se pueden controlar en las etapas de definición, concepción y diseño de los productos ya que corresponden a etapas posteriores como la fabricación o su uso.

Hoy día se acepta de forma general que la variabilidad es la causa principal de la falta de calidad de los productos y procesos y que el mejor momento para resolver el problema es en las etapas de definición y concepción. Dicho de otra forma, los productos y procesos no tan solo deben responder correctamente a las condiciones de laboratorio, sino también a las condiciones normales de fabricación, de operación y ambientales donde se ven sometidos a diversos tipos de perturbaciones (o *ruidos*, por analogía al ruido de fondo de las señales).

En este sentido, G. Taguchi [Tag, 1986] introdujo el concepto de *producto robusto*, o sea, aquel que mantiene las características de calidad en valores aceptables independientemente de las perturbaciones, tanto si se deben a la fabricación (variabilidad de los procesos), a causas externas (factores ambientales, de utilización) o a causas internas (deterioro o degradación), por lo que plantea la separación de los factores que intervienen en la respuesta de un sistema en dos grupos:

Factores de control

Son aquellos que el diseñador controla en el momento de la definición, concepción y diseño del producto (tipos de componentes adoptados, dimensiones de las piezas, velocidades de los accionamientos, temperatura de los procesos).

Factores de ruido

Son aquellos que el diseñador difícilmente puede controlar y que dependen de causas extrínsecas al diseño como la fabricación (tolerancias dimensionales, desequilibrios en los rotores, dispersión en los componentes electrónicos), el entorno (temperatura ambiental, humedad, contaminación electromagnética) o la utilización (fuerzas aplicadas por el usuario, maniobras no previstas, tiempo de funcionamiento).

No siempre la *respuesta* óptima de las características de calidad de un sistema para una determinada combinación de *niveles* de los *factores de control* es la más conveniente desde el punto de vista de la ingeniería. Cuando se hace intervenir la variabilidad originada por los *factores de ruido* pueden aparecer fenómenos que el diseño tradicional de experimentos no había puesto de manifiesto.

A continuación se retoma el Ejemplo 17.2 al que se le introducen unos factores de ruido. A pesar de que no es el método de análisis más habitual del fenómeno de la variabilidad, este ejemplo tiene la virtud de que facilita su comprensión.

Ejemplo: 17.2 (continuación)

Diseño de experimentos para el desequilibrio de una lavadora-centrifugadora

A continuación, se consideran dos factores de ruido típicos de las operaciones de centrifugado de ropa y que introducen variabilidad al proceso: Z_H , humedad que absorbe la ropa por kg (baja, -, y alta, +; por ejemplo, ropa de fibra y ropa de algodón); Z_C , nivel de carga de la lavadora (pequeña, -, y grande, +; por ejemplo, media carga y plena carga). Con estos dos factores de ruido se crea una matriz de diseño (4 alternativas) que se sitúa en la parte superior de la tabla y que, junto con los valores obtenidos anteriormente (nominales), ofrecen cinco respuestas para cada combinación de niveles de los factores de control:

	Factores de control			Factores de ruido					Resultados		
				Z_H	nom.	-	-	+	+	media	desvia. tipo
	X_S	X_A	X_M	Z_C	nom.	-	+	-	+		
1	-	-	-		38,1	17,0	7,7	48,0	24,5	27,1	16,2
2	+	-	-		41,8	36,0	27,0	50,8	31,5	37,4	9,3
3	-	+	-		27,9	27,3	8,6	29,5	11,9	21,0	9,9
4	+	+	-		30,2	19,6	16,8	33,9	26,3	25,4	7,1
5	-	-	+		31,7	18,0	7,7	37,3	11,4	21,2	12,8
6	+	-	+		34,1	24,8	24,3	44,4	25,8	30,7	8,6
7	-	+	+		21,1	8,9	6,5	28,4	10,8	15,1	9,3
8	+	+	+		22,7	20,0	16,2	23,7	19,4	20,4	2,9

A partir de los datos de la tabla se pueden calcular los valores medios y las desviaciones tipo de los resultados para cada una de las combinaciones de niveles de los factores de diseño (las dos últimas columnas de la tabla).

Aunque el valor medio más favorable continúa siendo el del experimento 7 (15,1 mm), la variabilidad de los resultados es muy elevada (desviación tipo de 9,3 mm). Sin embargo, se observa que el experimento 8 da un resultado más interesante. En efecto, a pesar de que la media es mucho más elevada (20,4 mm), su variabilidad es mucho más baja (desviación tipo de 2,9 mm) por lo que la combinación de niveles de este experimento da lugar a un comportamiento mucho más robusto del sistema. Este resultado también se confirma observando que el desplazamiento máximo pico-a-pico del tambor durante el centrifugado con los niveles de los parámetros de control del experimento 8 es sensiblemente más bajo que con los niveles del experimento 7.

De estos resultados se desprende, pues, que en una lavadora-centrifugadora ajustada a los niveles de los factores de control del experimento 8, habría que abortar el centrifugado muchas menos veces que ajustada con los niveles del experimento 7.

Visión de conjunto de las aportaciones de G. Taguchi

Hay un reconocimiento unánime de que el ingeniero japonés Genichi Taguchi ha realizado una de las aportaciones más importantes a la ingeniería de calidad de las últimas décadas, a pesar de que varios de los aspectos estadísticos y metodológicos que propuso han sido contestados y mejorados por otros autores.

Para hacer efectiva su estrategia de concebir productos robustos desde las etapas de definición y diseño, G. Taguchi [Tag, 1986] divide las actividades de la planificación y la mejora de la calidad *fuera de línea* en los tres pasos siguientes:

Diseño primario (o del sistema)

Consiste en aplicar el conocimiento científico y técnico para producir unos prototipos virtuales que definan las características de calidad básicas del sistema y sus valores iniciales. Una herramienta de gran ayuda para resolver este primer paso es el *desarrollo de la función de calidad* (QFD).

Diseño secundario (o de parámetros)

Es el paso más importante y consiste en hallar unos parámetros de forma que el comportamiento del sistema sea poco sensible (y a coste bajo) tanto a las variaciones intrínsecas (debidas al propio sistema) como extrínsecas (debidas al entorno).

Diseño terciario (o de tolerancias)

Este paso tiene por objeto disminuir la variación de las características de calidad reduciendo los campos de tolerancia de los factores de control cuando la variabilidad del diseño de parámetros es aún excesiva.

Los dos últimos pasos (*diseño de parámetros* y *diseño de tolerancias*) constituyen el núcleo de las técnicas de *diseño de experimentos* propuestas por G. Taguchi.

Primera prioridad de actuación

Siempre que sea posible, es recomendable abordar la concepción de los sistemas en base al *diseño de parámetros* para de esta forma, conseguir minimizar intrínsecamente las causas de la variabilidad y crear *productos robustos*. Después de identificar los factores de control, los factores de ruido y sus niveles de experimentación, se construyen dos matrices factoriales fraccionales (una para los factores de control y otra para los factores de ruido) y se realizan los experimentos para cada una de las condiciones de la matriz de ruido. Posteriormente se analiza el significado de sus efectos y, antes de darlos por buenos, Taguchi recomienda realizar unos experimentos de confirmación.

Segunda prioridad de actuación

Tan solo si la vía del diseño de parámetros no da unos resultados suficientemente aceptables, hay que recurrir al *diseño de tolerancias* y a tal fin, G. Taguchi define unas funciones de *pérdida de calidad* que deben ser minimizadas.

Método AMFE

Definición

El AMFE (*análisis de los modos de fallo y sus efectos*; FMEA, *failure modes and effects analysis*, MIL-STD-16291) es una herramienta de predicción y prevención, que, a través del estudio de la disponibilidad y seguridad de los productos, procesos (e incluso organizaciones), se orienta a proponer mejoras.

Concretamente, consiste en un análisis cualitativo sistemático de los fallos potenciales o reales de un sistema, de sus causas y consecuencias y permite poner en evidencia los puntos críticos para definir acciones correctoras.

Su aplicación puede abarcar distintas fases del ciclo de vida y de una forma muy especial, permite evaluar un producto (tanto después de su diseño como después de su fabricación), un proceso de fabricación y su industrialización, un equipo de fabricación, o la explotación y el mantenimiento. Resumiendo, pueden darse los siguientes tipos de AMFE:

denominaciones	objetivos deseados
AMFE producto	Mejorar la fiabilidad de un producto a través de su concepción
AMFE proceso	Mejorar el proceso de fabricación de un producto
AMFE med. producción	Mejorar la fiabilidad de los medios de fabricación del producto
AMFE seguridad	Garantizar la seguridad en los procesos que representen riesgos para el hombre
AMFE organización	Mejorar la fiabilidad de la organización de una actividad o de un servicio

Para su aplicación se establece un grupo de trabajo pluridisciplinario con la presencia, dependiendo del ámbito, de las distintas voces significativas: diseño, fabricación, calidad, mantenimiento, usuarios.

El AMFE fue aplicado por primera vez a la industria aeroespacial americana en la década de 1960 y en tiempos más recientes ha sido objeto de aplicación en otras industrias, especialmente en las de automoción (algunas empresas exigen realizar un AMFE antes de la recepción de equipos de fabricación). Esta es una herramienta de apoyo interesante en la perspectiva de la ingeniería concurrente.

Pasos a seguir

Para la realización de un AMFE (y, en concreto, de un AMFE producto) se requiere un proceso en el cual deben planificarse las siguientes actividades:

- Constitución del grupo de trabajo
- Análisis preliminar
 - Definición del sistema o del producto
 - Descomposición funcional y estructural
 - Análisis de las condiciones de utilización
 - Límite y objetivo del estudio
- Análisis AMFE propiamente dicho
 - Análisis cualitativo de los fallos
 - Evaluación de la criticidad
 - Búsqueda de soluciones preventivas o correctivas
- Seguimiento

Fase 1: Análisis preliminar

Debe ser realizado por un técnico con suficiente conocimiento del objeto analizado (producto, proceso) y del método AMFE. Es una actividad muy importante para la posterior eficacia de su desarrollo y comprende los apartados siguientes:

Definición del producto o sistema:

- División del sistema en subsistemas (o módulos)
- Descomposición funcional de los módulos

Análisis de las condiciones de explotación:

- Modos de operación
- Condiciones de ambiente
- Condiciones de utilización
- Condiciones de mantenimiento

Límite y objetivos del estudio

Fase 2: Análisis cualitativo de los fallos

Tiene por finalidad identificar los mecanismos de fallo de manera exhaustiva y se procede a través de los siguientes pasos:

Para cada componente del sistema en el modo de operación considerado:

- Identificación de los modos de fallo

Para cada modo de fallo:

- Buscar los efectos en el sistema (locales, finales). Buscar las posibles causas

Para cada conjunto causa / modo de fallo:

- Listado de los medios de prevención puestos en práctica
- Listado de los medios de detección adoptados

Para poder precisar más estas acciones se establece la siguiente terminología:

Función	Acción de un componente en términos de finalidad
Fallo	Pérdida o degradación de la función
Modo de fallo	Forma de apreciar el fallo
Causa del fallo	Circunstancia que origina el fallo
Efecto del fallo	Consecuencia en los distintos niveles del sistema
Mecanismo de fallo	Procesos por los que se produce la disfunción
Medio de prevención	Medio para evitar la causa (o el modo) de fallo
Medio de detección	Medio para detectar la causa (o el modo) de fallo antes de que se produzca

En el cuadro siguiente se clasifican los *modos de fallo*, las *causas de fallo* y los *efectos del fallo* (para componentes mecánicos):

Modos de fallo

clasificación	ejemplos
pérdida de la función	rotura, bloqueo, gripado
degradación de la función	juego, desalineación, desgaste deformación, aflojamiento corrosión, fuga, incendio

Causas de fallos

clasificación		ejemplos
causas internas al sistema	diseño o proyecto	elección de principios de funcionamiento elección de componentes dimensiones, formas, materiales
	fabricación	estados superficiales procesos
causas externas al sistema	entorno	temperatura ambiente, humedad, polución vibraciones, choques
	mano de obra explotación	montaje, reglaje, control utilización y mantenimiento
	otros sistemas	fuentes de energía instalaciones (agua, gas, aire comprimido)

Efectos de los fallos

clasificación	ejemplos
efectos locales sobre el componente	sobre su funcionamiento sobre su estado
efectos locales sobre otros componentes o subsistemas	sobre su funcionamiento sobre su estado
efectos finales sobre el equipo sistema global o sobre equipos exteriores al sistema	sobre la disponibilidad del sistema sobre la productividad del sistema sobre el mantenimiento del sistema sobre la seguridad del usuario

Fase 3: Evaluación de la criticidad

Su objetivo es dar un valor (índice) de criticidad, C , para cada fallo evaluado a partir de tres criterios

F : Frecuencia (o probabilidad) de aparición del fallo

N : Probabilidad de no detectar el fallo

G : Gravedad del efecto final del fallo

según la expresión: $C = F \cdot N \cdot G$. Como más elevado sea este valor, más crítico es el fallo. En esta fase se procede a través de los siguientes pasos:

- Escoger el número de niveles (3 a 10)
- Definir el significado de cada nivel (tabla de acotación)
- Definir el límite de aceptación (solo para la criticidad)
- Revisar todas las combinaciones de causas/modos/efectos y proceder a la acotación de F , N y G
- Calcular la criticidad en cada caso y jerarquizar los fallos según su criticidad

Ejemplo de escala de acotación a 4 niveles con unas posibles definiciones

Acotación	frecuencia F	no detectabilidad N	gravedad G
1	muy fiable (1 fallo al año)	detección al 100 % (evidente)	mínima (fallo no molesta)
2	fiable (1 fallo al trimestre)	detección probable (no evidente, pero aparente)	significativa (molestia moderada)
3	poco fiable (1 fallo al mes)	detección improbable (delicada de identificar)	crítica (molestia importante)
4	nada fiable (1 fallo a la semana)	no detectable (no se puede descubrir)	catastrófica (gran daño)

Fase 4: Búsqueda de medidas correctivas o preventivas

Su objetivo es disminuir aquellos modos de fallo que sobrepasen un determinado umbral del índice de criticidad, C , a través de proponer e implantar medidas correctivas o preventivas. Se puede actuar sobre todos los factores de la criticidad, pero se suele actuar sobre alguno de ellos que sobresalga de forma destacada.

El establecimiento del umbral es un aspecto importante ya que, con un umbral excesivamente bajo, se estarían buscando soluciones para aspectos poco críticos, mientras que con un umbral excesivamente elevado, no se tratarían algunos modos con criticidad importante. Sin embargo, éste es un tema que puede decidirse a la vista del análisis de criticidades.

Medidas a tomar:

- Modificaciones de concepto, fabricación y montaje
- Poner en práctica controles y ensayos
- Recomendaciones sobre formas y limitaciones de uso
- Recomendaciones sobre el mantenimiento

Ejemplos de medidas correctivas y preventivas

factor a disminuir	medidas a tomar
frecuencia, F	mejorar la fiabilidad en la concepción revisar los procesos de fabricación y útiles de montaje condiciones de utilización, de detección facilitar los sistemas de reglaje y puesta a punto prever medidas de mantenimiento preventivo
no detectabilidad, N	modificar el principio de solución facilitar la visión o el acceso a determinadas partes incorporar sistemas de detección, alarmas proponer medidas de mantenimiento predictivo
gravedad, G	modificar el principio de solución incorporar protecciones y resguardos advertir de los peligros proponer medidas de mantenimiento

Caso 3.9

Aplicación del método AMFE a un bolígrafo

Se analiza un bolígrafo retráctil recambiable con una pestaña formando parte del mismo cuerpo plástico para la sujeción en un bolsillo.

Algunos de sus elementos con los correspondientes modos de fallo son:

- *Bola* de acero para la escritura, cuyo giro distribuye la tinta en el papel
- Mecanismo *retráctil*, para sacar y retirar el conjunto bola-depósito de tinta del cuerpo del bolígrafo
- *Pestaña* de fijación, para sujetar el bolígrafo en un bolsillo de la ropa

Los principales modos de fallo, sus efectos y causas, son los siguientes:

- La *bola* puede deformarse (o romperse) a causa de un defecto de fabricación o de una caída o golpe lo que daría lugar a una escritura irregular inadmisible
- El mecanismo *retráctil* puede fallar o bien no reteniendo el conjunto bola-depósito en su posición salida, o bien atascándose y no permitiendo su retirada. Los efectos en estos dos casos son distintos: mientras que en el primero impide la escritura, en el segundo propicia el peligro de manchas en la ropa.
- La *pestaña* de sujeción puede fallar por deformación (fluencia) y por rotura. También aquí los efectos son distintos: en el primer caso, el bolígrafo puede perderse, mientras que en el segundo caso, se olvida, no está en su sitio o propicia manchas.

En la tabla de apoyo al AMFE se han valorado (colectivamente, entre todos los participantes) los distintos factores y criticidades y, a la vista de los resultados, se decide actuar a partir de un índice de criticidad de $C \geq 9$:

- *Bola* deformada o rota durante la fabricación, 9. Probablemente la mejor medida es actuar sobre la inspección del producto, ya que disminuye la detectabilidad.
- El mecanismo *retráctil* no mantiene abierto, 9: Las medidas pueden dirigirse a la fiabilidad, ya sea a través de la fabricación (por ejemplo, quitar rebabas, si es el caso), ya sea a través del rediseño del mecanismo
- *Pestaña* rota y peligro de manchas, 12. Sobre el único factor que se puede actuar es sobre la fiabilidad. Por ejemplo, se substituye por una pieza metálica.

Tabla para el análisis AMFE del bolígrafo

componentes		fallos			medios actuales	acotación				acciones a tomar
design.	func.	modos	efectos	causas		F	N	G	C	
bola		no gira	escribe mal	fabricación		1	3	3	9	
				caída uso		2	1	3	6	
retráctil		no abierto	no escribe	fabr/diseño		3	1	3	9	
		no cerrado	manchas	diseño		1	1	4	4	
pestaña		se suelta	se pierde	deformada		1	2	3	6	
		no se sujeta	se olvida	rota		3	1	2	6	
			manchas			3	1	4	12	

3.5 Diseño para el entorno (DFE)

Introducción

Cada día aumenta el número de circunstancias alrededor de los productos, máquinas y sistemas que inciden y condicionan su diseño desde numerosos puntos de vista, tendencia que probablemente no hará más que ir en aumento. Nos estamos refiriendo entre otras a:

- La disponibilidad de los productos y sistemas
- La relación hombre-máquina
- La seguridad de las máquinas
- El ahorro energético y los impactos ambientales
- La problemática del fin de vida de los productos

La característica común de todos estos temas es que su incidencia va más allá de la empresa y sus efectos recaen fundamentalmente en los usuarios y en la colectividad (ver *ingeniería concurrente orientada al entorno*; Sección 1.1) y el mercado no constituye una herramienta adecuada para su regulación ya que la mayoría de ellos repercuten en costes para las empresas sin una contrapartida tangible en prestaciones o argumentos de venta para los productos.

Es por ello que los poderes públicos y administraciones están sometiendo estos temas a regulaciones que, si bien constriñen las libertades de diseño, son necesarias para asegurar la calidad de vida de la sociedad. Entre estas regulaciones destacan la directiva de la CE 93/1989 y las normas EN 292 y 293 (y derivadas) para la seguridad de máquinas, las normas ISO 14000 relativas al sistema de gestión medio ambiental y varias directivas para sectores concretos (automoción, embalaje) que regulan aspectos del fin de vida.

A menudo se producen contradicciones entre los distintos requerimientos y necesidades del entorno y de la empresa. Por ejemplo, ciertas estrategias de mantenimiento colisionan con la reutilización o el reciclaje; algunos requerimientos ergonómicos pueden ser contradictorios con la seguridad; o dispositivos de protección al medio ambiente reducen la competitividad.

Todo ello hace pensar que en los tiempos que vienen se va a producir un gran debate sobre la ingeniería concurrente orientada al entorno y que los futuros proyectos deberán tomar importantes decisiones relacionadas con estos aspectos al iniciar el diseño de los productos.

En esta última Sección de este texto se trata la incidencia de varios de estos temas en el diseño de productos, máquinas y sistemas.

Diseño y disponibilidad

El concepto de *disponibilidad* trasciende los conceptos de *fiabilidad* y de *mantenibilidad* y se define como la aptitud de un producto, máquina o sistema para cumplir su función, o estar en condiciones de hacerlo en un momento dado cualquiera.

Ejemplo: si un granjero requiere 100 veces su tractor y 98 funciona correctamente, la disponibilidad habrá sido del 98% (también habría podido medirse en tiempos: de 100 horas de trabajo requeridas, 98 ha funcionado satisfactoriamente).

La noción de disponibilidad articula los efectos de tres conceptos:

- *Fiabilidad*
Es la aptitud de un sistema para funcionar correctamente a lo largo de un tiempo determinado prefijado. Para precisar el concepto de fiabilidad hay que establecer unas *condiciones admisibles* de funcionamiento, por debajo de las cuales se considera que se ha producido un fallo.
- *Mantenibilidad*
Es la aptitud de un sistema para ser mantenido. Y mantenimiento es el conjunto de acciones que permitan *mantener* o *restablecer* un producto o un sistema a una condición admisible para asegurar un determinado servicio, todo ello al coste global óptimo a lo largo de su ciclo de vida.
- *Logística de Mantenimiento*
Es el conjunto de medios materiales (talleres, utillajes, recambios, documentación, medios de transporte) y personales (operarios especializados) necesarios para, después de haberse producido una incidencia, volver a situar el producto, máquina o sistema en condiciones de utilización.

Ejemplo: retomando el caso del granjero y su tractor, podría darse el caso de que la máquina tuviera una gran fiabilidad pero que, dada una incidencia (por ejemplo, un golpe con una roca), el tiempo de reparación fuera extraordinariamente largo o que durante días debiera esperarse la llegada de determinada pieza. A pesar de la buena fiabilidad, los demás aspectos incidirían negativamente en la disponibilidad. A partir de ahí se podrían definir con mayor rigor como medir los conceptos de fiabilidad y mantenibilidad, precisar qué es un fallo y en definitiva, avanzar en las disciplinas sobre la fiabilidad, el mantenimiento y la logística.

Sin embargo, éste no es el objetivo de este apartado, sino el de llamar la atención sobre el hecho de que, al concebir y diseñar un producto, una de las grandes decisiones que hay que tomar (o en todo caso que se toma implícitamente) hace referencia a la estrategia sobre la *disponibilidad*.

Estrategias frente a la disponibilidad

Hay dos estrategias límite en el diseño frente a la *disponibilidad*:

- a) La disponibilidad del producto descansa enteramente sobre la *fiabilidad* y se anulan la *mantenibilidad* (no se prevé su desmontaje) y la *logística de mantenimiento* (red de talleres especializados, manuales de mantenimiento, utillajes especiales y recambios). Son, pues, productos *fiables* pero *no mantenibles*.
- b) En el otro extremo se hallan máquinas o sistemas, generalmente fabricados en pequeñas series o incluso en una sola unidad, en las que la combinación de varios factores (costes elevados y vida prolongada; dificultades para realizar simulaciones y ensayos para asegurar la *fiabilidad*; condiciones de funcionamiento severas que comportan desgastes, corrosiones, u otros deterioros inevitables) hace recomendable hacer descansar la *disponibilidad* en el *mantenimiento* y su *logística* (dispositivos de detección de fallos, facilidad de inspección y reparación, equipos de mantenimiento especializados).

Otros productos y máquinas han sido diseñados para responder, respecto a la *disponibilidad*, a situaciones intermedias entre las dos descritas anteriormente. La decisión sobre qué *disponibilidad* debe de tener un producto y cómo conseguirla constituye una de las principales decisiones y tareas del diseño.

Un-solo-uso, usar-y-tirar

Ya se ha comentado anteriormente la proliferación de los productos de *un-solo-uso* o de *usar-y-tirar*. Esta estrategia se aplica a productos de consumo por razones de comodidad o higiénicas (embalajes; toallas, manteles, pañuelos de papel; material clínico).

Esta estrategia da lugar a importantes repercusiones en consumos de energía y en el reciclaje de materiales.

Usar-hasta-fallar

Muchos de los pequeños electrodomésticos se han inclinado por una estrategia similar a la de *usar-y-tirar* y que denominamos de *usar-hasta-fallar*. Se basa en una *fiabilidad* muy bien estudiada (se pondera cuidadosamente el precio y el tiempo de utilización previsto) y una elevada calidad de fabricación (para evitar retornos) y la eliminación total de *mantenimiento* y su *logística* asociada.

Esta estrategia da lugar a un importante abaratamiento de costes y, si se ha previsto un tiempo de vida razonable, sus repercusiones ambientales no son superiores a otras alternativas (ver Caso 3.10)

Mantenimiento por substitución de módulos

Esta estrategia se da en productos fabricados en serie pero de mayor complejidad que los casos anteriores (automóviles, grandes electrodomésticos, equipos industriales estándar). Consiste en basar una parte importante de la *disponibilidad* en la *fiabilidad*, pero admitir el *mantenimiento* en la substitución de módulos. Con ello se consigue una simplificación de la política de recambios y unos menores requerimientos profesionales para los operarios que realizan el mantenimiento. Tiene repercusiones negativas en el fin de vida ya que simples fallos en elementos concretos inducen el rechazo de módulos enteros de notable complejidad y coste.

Sistemas basados en componentes

En el caso de máquinas, instalaciones o sistemas de gran complejidad, donde no suele ser posible (o deben ser limitados) la realización de simulaciones y ensayos, hay una tendencia a hacer descansar parte de su *disponibilidad* en componentes de mercado que, en general, tienen una *fiabilidad* probada y la misma estructura del sistema por composición de componentes facilita su *mantenibilidad* y el mercado la *logística* para resolver la falta de disponibilidad que puede derivarse de la complejidad del conjunto del sistema.

Ejemplo: Muchas máquinas o sistemas de procesos específicos caen dentro de esta categoría. Entre ellas habría el ejemplo del sistema de clasificación de cajas (Ejemplo 2.2 de la Sección 2.4)

Ejemplo 3.3

Nueva estrategia sobre disponibilidad en robots industriales

Los robots industriales son máquinas de proceso que, más allá de sus prestaciones, se les exige una muy elevada disponibilidad para evitar repercusiones negativas en la producción.

Hace unos años, uno de los principales fabricantes de robots industriales cambió radicalmente su estrategia respecto a la disponibilidad de sus máquinas: *a)* Por un lado, reforzó la fiabilidad del producto y sus componentes; *b)* Por otra parte, rediseñó sus máquinas sobre la base de un concepto modular y procuró que cualquier módulo del robot pudiera ser substituido en menos de una hora; *c)* Y, finalmente, decidió eliminar las reparaciones de módulos y concentrar la resolución de estas incidencias (siempre por substitución) en la sede central.

Los argumentos de la empresa para estos cambios fueron: 1) El robot y sus módulos tienen una alta fiabilidad y, por lo tanto, son de esperar muy pocas incidencias; 2) Al aparecer una incidencia, la gran mantenibilidad por substitución redonda muy favorablemente en la disponibilidad; 3) Finalmente, debido al bajo número de incidencias (por ejemplo, el fallo de un accionamiento, de coste muy elevado), y ante la dificultad de llevar a término una reparación con garantías (parte de la vida consumida, ajuste de parámetros, reductores con juego cero), es más económica su simple substitución.

Caso 3.10

Evolución de las batidoras en relación con la disponibilidad

Batidora de vaso

Las primeras batidoras de los años 1950 y 1960 tenían el motor en la base y encima se colocaba un vaso dentro del cual se movía el agitador (Figura 3.17a). Ya se adivina no tan solo la dificultad de operación de este aparato (desmontar el vaso con el producto batido dentro, a la vez que se desconecta el eje que, a su vez, atraviesa el fondo del vaso), sino además el peligro de filtraciones de líquidos hacia la parte del motor que podría originar fallos. Tampoco la limpieza era fácil.

La disponibilidad de este aparato, cuyo precio era relativamente elevado comparado con los de hoy día, se confiaba más que en la fiabilidad en la mantenibilidad (o sea, en la posibilidad de ser reparada, en la existencia de recambios y en una red de talleres capaces de realizar la reparación).

Batidora de mano mantenible

Hacia los años setenta se comercializaron las batidoras de mano en las que el concepto había cambiado totalmente. Se había convertido en un aparato para ser manipulado a mano introduciéndolo desde arriba dentro de un vaso cualquiera. El motor se encuentra en la parte superior del aparato, fuera del vaso, y un largo eje transmite el movimiento hasta el rotor en el otro extremo (Figura 3.17b).

Este aparato, de precio aún relativamente elevado comparado con los de hoy día, está previsto para ser desmontado en caso de reparación. En relación con la disponibilidad, la diferencia con el aparato anterior es que las probabilidades de filtración de líquidos durante el funcionamiento son mucho menores, ya que la gravedad tiende a apartar los líquidos del motor. Sin embargo, durante el lavado es fácil que se filtre agua. La estructura de la disponibilidad es parecida al caso anterior pero se mejora algo la fiabilidad.

Batidora integral no desmontable

Este tercer tipo de batidora (Figura 17.17c), aunque parecida a la anterior, cambia radicalmente el concepto por lo que se refiere a la disponibilidad. En este caso la batidora es integral, o sea que después de su montaje se ha cerrado de forma que no se puede desmontar y por lo tanto, no es mantenible. Respecto a la versión anterior se dan varias circunstancias que son importantes: *a)* Ha aumentado la fiabilidad intrínseca (a través del diseño) y la extrínseca (una dificultad mucho mayor de filtraciones de agua, a pesar de que debe situarse bajo el grifo para lavarlo); *b)* Al no ser mantenible, además de facilitar el montaje se elimina todas las actividades relacionadas con el mantenimiento y la reparación (manuales de reparación, utillajes específicos, recambios, red de talleres de reparación) lo que redundará en una importante disminución de los costes y por lo tanto, del precio.

Aquí la *disponibilidad* se confía enteramente en la *fiabilidad*.

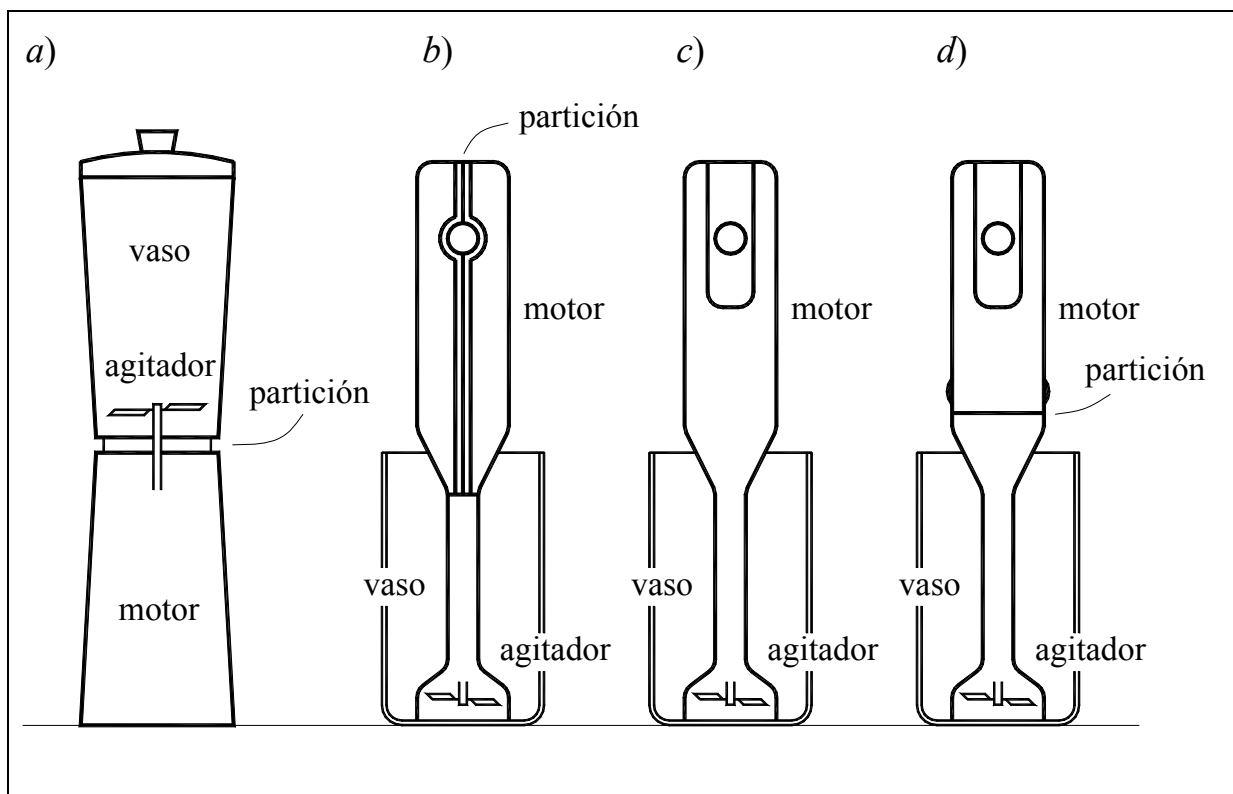


Figura 3.17 Evolución de las batidoras y su relación con las estrategias de mantenimiento: *a)* Batidora de vaso; *b)* Batidora de mano, mantenible (se puede desmontar); *c)* Batidora de mano integral, no mantenible (no desmontable); *d)* Batidora de mano integral con agitador separable, no mantenible (no desmontable).

Batidora integral con agitador desmontable

Esta es una nueva versión de batidora que ha aparecido en los últimos años (Figura 17.17d). Se caracteriza por ser una batidora de mano integral (no puede desmontarse para acceder a la maquinaria) pero que tiene un dispositivo que permite separar el agitador, o sea la parte que entra en el vaso y que, por lo tanto, se ensucia de producto. La parte del agitador está construida de forma que no tiene ningún problema en ser lavada, incluso dentro de un lavaplatos, mientras que la parte donde hay el motor (también protegida, incluso con los botones de mando y para activar la separación realizados de un material de elastómero que se deforma) no tiene porqué lavarse bajo el grifo. Al no ser mantenible, ahorra todos los costes relacionados con el mantenimiento y su logística, lo cual representa una eliminación de costes y una disminución del precio, aunque mayor que en el caso anterior.

La disponibilidad se obtiene íntegramente por medio de la fiabilidad, pero en este caso aún se asegura más, ya que se evita el contacto de la parte del motor con el agua durante el lavado.

Caso 3.11

La mantenibilidad en el proyecto de módulo de andén de geometría variable

El proyecto de módulo de andén de geometría variable desarrollado conjuntamente entre la Universitat Politècnica de Catalunya y Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya S.A., tiene por función principal adaptar el andén y un ferrocarril metropolitano (andén a nivel de la plataforma) en estaciones en curva, a fin de evitar la caída de pasajeros (de graves consecuencias) en los espacios que quedan entre la forma necesariamente poligonal del ferrocarril y la forma necesariamente curva del andén. Para ello se disponen el número de módulos necesarios en paralelo, con la parte desplegable alineada en el borde del andén. Una vez parado el tren, los módulos se despliegan hasta hacer contacto con los vehículos y luego retroceden una pequeña distancia a fin de dejar abrir las puertas hacia afuera. Antes de partir el tren, los módulos se repliegan otra vez.

El diseño del módulo estuvo presidido por dos preocupaciones principales: la *seguridad* y la *disponibilidad*, ya que los elementos auxiliares de una explotación de ferrocarril como es el andén de geometría variable, no pueden permitirse de provocar un paro o un accidente en la línea.

La disponibilidad es función de la *fiabilidad*, de la *mantenibilidad* y de la *logística de mantenimiento*. La primera se aseguró a través de ensayos de durabilidad por medio de un banco de pruebas construido a este efecto (ver Figura 1.8) y la compañía debía asumir la logística de mantenimiento. Había que resolver, pues, la mantenibilidad.

El módulo de andén se concibió para en caso de avería, ser retirado rápidamente del andén y ser substituido por otro en la misma operación. Para ello, se dispuso un elemento de soporte fijado al andén con capacidad de regulación (altura y posición) en la primera instalación. El módulo desliza por este elemento de soporte, de forma parecida a un cajón, se engarza con unos agujeros en la parte delantera y se fija con 2 tornillos en la trasera. Las tomas neumática y eléctrica del módulo son de conexión rápida.

Ya en el taller, el módulo también fue concebido para un mantenimiento fácil. Sacados los 10 tornillos laterales que fijan la tapa superior con la base del módulo, el resto de grupos se separa sin necesidad de herramientas, simplemente por desenganche: primero el suelo extensible, después el soporte del suelo extensible (en este grupo y el siguiente hay un conector rápido) y finalmente, la caja de mecanismos (ver Figura 3.18).

A su vez, cada uno de estos grupos tiene una gran accesibilidad por lo que la reparación de cualquier de sus componentes no conlleva dificultades excesivas.

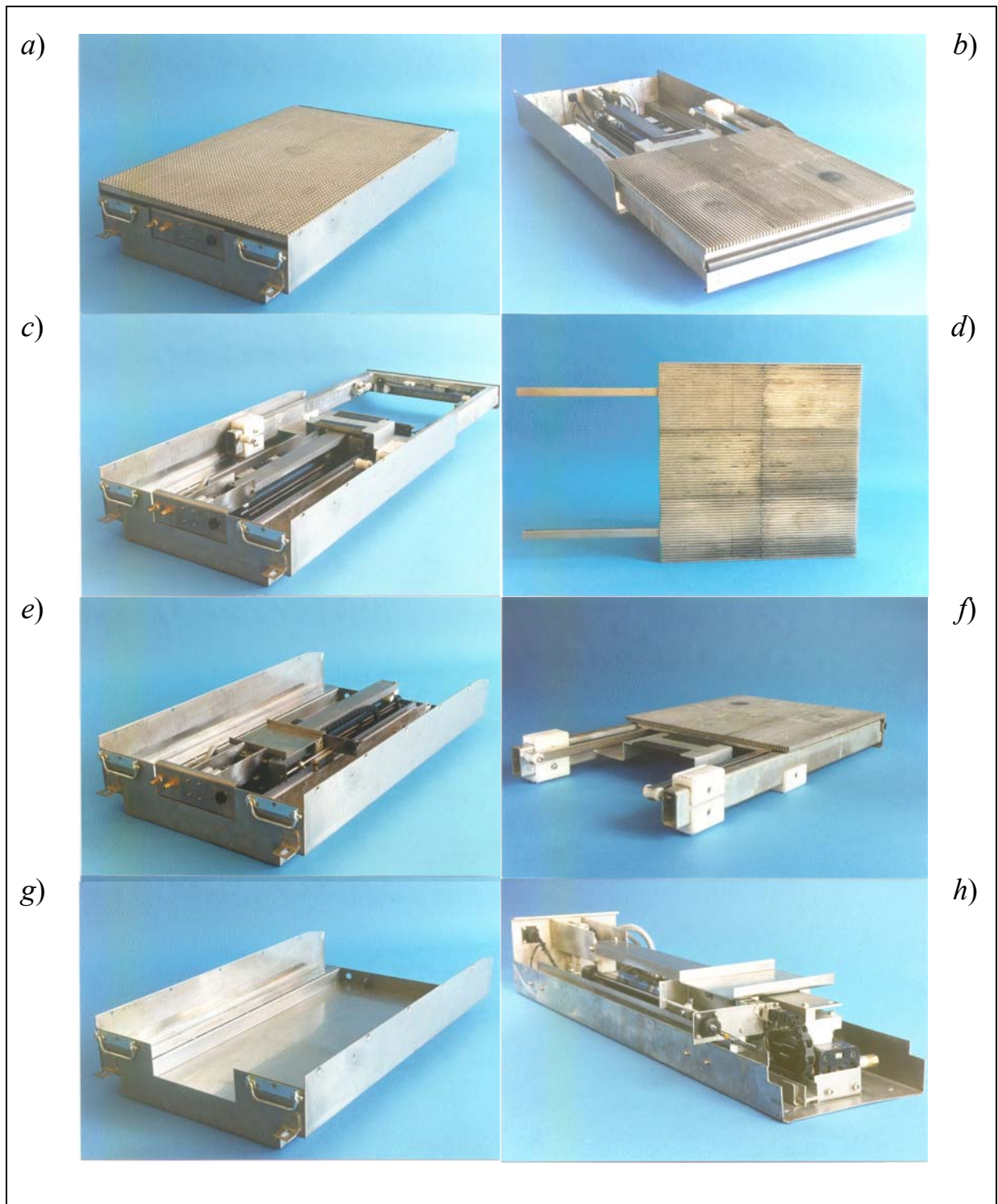


Figura 3.18 Módulo de andén de geometría variable. Secuencia de desmontaje: *a)* Módulo completo (vista posterior); *b)* Módulo sin tapa (vista anterior, desplegado); *c)* Sin tapa ni suelo extensible; *d)* Suelo extensible; *e)* Sin soporte de suelo extensible; *f)* Soporte y suelo extensible con suelo; *g)* Caja del módulo; *h)* Caja de mecanismos

Diseño y ergonomía

El concepto moderno de *ergonomía*, que etimológicamente procede de los términos griegos *ergon* (trabajo) y *nomos* (ley o norma), se debe a K.F. Murrell y fue adoptado por la asociación inglesa Ergonomics Research Society en 1949, con el objetivo de *adaptar el trabajo al hombre* [Mon, 2001-1]. Los americanos suelen usar el término *factor humano* que, con ciertos matices, tiene el mismo significado.

Entre las muchas definiciones de ergonomía se citan las dos siguientes: la primera dada por Wisner en 1973, es más próxima al objetivo de este texto (*conjunto de conocimientos científicos relativos al hombre necesarios para concebir herramientas, máquinas y dispositivos que puedan ser utilizados con la máxima eficacia, seguridad y confort*), mientras que la segunda, adoptada por la International Ergonomics Association, tiene un carácter más general (*integración de conocimientos derivados de las ciencias humanas para estudiar de forma conjunta trabajos, sistemas, productos y condiciones ambientales vinculadas a habilidades mentales, físicas y limitaciones de las personas*).

La ergonomía es, pues, una disciplina que trata los aspectos siguientes: *a) Estudio pluridisciplinario* (ingeniería, medicina, psicología, estadística, economía) de la relación entre las personas y su entorno, especialmente de sus limitaciones y condicionantes; *b) Intervención* en la realidad exterior, tanto la natural como la artificial, para mejorar la relación de las personas con su entorno (con los objetos y en las formas de actuación) en vistas a la eficacia, el confort, la salud y la seguridad.

Los primeros estudios y aplicaciones de la ergonomía se orientaban al mundo laboral y ponían el énfasis en la mejora y diseño de puestos de trabajo (aplicación que hoy día continúa teniendo una gran importancia [Mon, 2001-2]), pero cada vez más la ergonomía ha ido tomando un carácter general y hoy día se aplica a una gran diversidad de ámbitos de la actividad humana (utensilios de uso cotidiano, conducción de vehículos, sistemas de ocio).

En otro orden de cosas, se puede hablar de *ergonomía preventiva* (o planificada en el momento de la concepción de productos, máquinas y sistemas) y la *ergonomía correctiva* (que interviene después de que los sistemas hayan sido construidos). La primera es la que más interesa desde la perspectiva de la ingeniería concurrente.

En la *ergonomía aplicada* se pueden enunciar los siguientes principios: *a) Supremacía de la persona*. En cualquier producto, proceso o sistema hay que mantener la supremacía de la persona que lo utiliza, lo manipula y se beneficia en todas las etapas del ciclo de vida; *b) Capacidad limitada de modificación de la persona*. Debe reconocerse la limitación para modificar los aspectos psíquicos y físicos de las personas, más allá del entrenamiento; *c) Evitar daños a las personas*. Los productos, máquinas y procesos nunca deben causar daños a las personas, ni físicos ni mentales, ni accidentes, ni enfermedades, dolencias o defectos que se adquieran con el tiempo.

El marco de la intervención ergonómica

Cualquier actividad humana se realiza en un marco determinado por las posibilidades y limitaciones de las personas (carga física y carga mental) y los condicionantes impuestos por los factores de entorno

Carga física.

Incidencia de una actividad en determinados sistemas físicos de las personas (en especial, los sistemas músculo-esqueleto, respiratorio y cardiovascular) donde tienen una especial importancia el levantamiento y manipulación de cargas y el gasto energético.

Se han desarrollado varios métodos para evaluar y valorar ciertos aspectos de la carga física de puestos de trabajo en líneas de producción, siendo algunos de los más conocidos: método NIOSH (National Institute of Safety and Health, USA) para evaluar el levantamiento de cargas; método OWAS aplicable a puestos de trabajo donde el trabajador adopte posiciones de trabajo extremas o fijas; y el método RULA (alemán), especialmente adecuado para evaluar movimientos repetitivos.

Carga mental

Incidencia en las capacidades mentales de una persona de la cantidad de información que debe tratar, el tiempo de que dispone y la importancia de las decisiones que debe tomar, afectadas por otros factores más subjetivos como la autonomía, la motivación, la frustración o la inseguridad.

Los desajustes entre las capacidades de las personas y la carga mental conducen a trastornos, tanto si se trata de sobrecarga mental cuantitativa (demasiado que hacer), cualitativa (demasiado difícil) o de infracarga mental (trabajos por debajo de la calificación profesional). En otros casos, se puede incidir en el diseño de las máquinas y sistemas para disminuir la carga mental.

Factores ambientales

Las condiciones ambientales inciden en la intervención ergonómica, ya sea a través de las capacidades de las personas para soportar la carga física o mental, ya sea a través de influir en las interacciones de persona-máquina:

Iluminación. Es uno de los factores ambientales que tienen más importancia ya que de él depende una buena y correcta comunicación visual. La iluminación tiene una especial incidencia en los nuevos sistemas basados en la informática, sobre todo aquellos que implican estar largas horas ante pantallas de ordenador.

Ruido. La limitación del ruido ambiental es importante en aquellas actividades que comporten la comunicación a través de la voz o de señales sonoras. En todo caso, un excesivo nivel sonoro incide negativamente en la carga mental.

Temperatura. El confort o el estrés térmico son aspectos determinantes para el uso eficaz de los objetos y las máquinas. En especial deben temperarse los objetos que deban ser manipulados durante largos ratos (por ejemplo, el volante de un automóvil).

Ergonomía en el diseño

Los productos, máquinas y sistemas son concebidos para satisfacer las necesidades de las personas y no al revés y, por lo que los principios ergonómicos son uno de los principales aspectos que deben tenerse presentes en el diseño.

No todos los productos y máquinas tienen el mismo tipo de requerimientos en función de los usos previstos. Por ejemplo, no es lo mismo el diseño de una bicicleta donde son prioritarios aspectos relacionados con la carga física (dimensiones, aplicación de esfuerzos, gasto energético), el diseño de un ordenador, donde es prioritaria la carga mental (facilitar la comunicación, eliminar operaciones mentales innecesarias), o el diseño de determinados mandos del automóvil donde hay que asegurar respuestas precisas y rápidas.

Se destacan los siguientes aspectos de la intervención ergonómica en el diseño:

Diversidad y antropometría

Algunas intervenciones ergonómicas se destinan a una persona concreta (aparatos ortopédicos, vestidos a medida), pero la mayoría de productos, máquinas y sistemas se prevén para ser utilizados por amplios colectivos de población en un mercado cada vez más globalizado.

La *antropometría* estudia las medidas de las personas (dimensiones del cuerpo humano, movimientos y fuerzas, masas y volúmenes) valores que son distintos de unas personas a otras y donde inciden aspectos como la procedencia, la edad o el sexo. Hay que aplicar con prudencia las bases de datos antropométricas disponibles ya que, por ejemplo, los valores de una población nórdica pueden ser una mala referencia para las personas de países latinos.

Para resolver el problema de la diversidad antropométrica en el diseño, cada día es más frecuente la estrategia de la adaptabilidad, ya sea a través de la regulación física de posiciones y dimensiones (asientos y volante, en el automóvil) o de la personalización (configuración de funciones y presentaciones, en los sistemas informáticos).

Interacción persona-máquina

También tiene una gran incidencia en el planteo de la intervención ergonómica la consideración global sobre el suministro de la energía y el control de las máquinas o sistemas, para lo cual se pueden dar las siguientes situaciones:

Interacción manual. La persona usuaria aporta la energía para el funcionamiento del sistema y la información para su control va indisolublemente ligada a la energía de la actuación. Por ejemplo, unos alicates o una cerradura.

Interacción mecánica. La persona usuaria aporta una cantidad limitada de energía y la máquina la amplifica por medio de una fuente exterior. La actividad principal de la persona se centra en la recepción y emisión de información para su control. Por ejemplo, un torno manual o un automóvil.

Interacción automática. Sistemas autoregulados en los que la intervención de la persona se da fundamentalmente en la programación y el mantenimiento. Por ejemplo, un torno de control numérico o una puerta de apertura automática.

Para determinar qué tipo de interacción es la más adecuada en cada caso (manual, mecánica o automática) deben caracterizarse los puntos fuertes y débiles de las personas y de las máquinas: las personas son superiores en la detección de estímulos débiles (por ejemplo, estímulos sonoros con un elevado nivel de ruido), reconocer patrones complejos o situaciones inesperadas, una gran flexibilidad de actuación y decidir sobre soluciones alternativas. Las máquinas pueden recibir estímulos más allá del campo de percepción humana y son mejores en almacenar mucha información codificada, dar una respuesta rápida de forma automática, ejercer grandes fuerzas y movimientos bien guiados, ejecutar operaciones repetitivas durante mucho tiempo sin acusar fatiga, realizar acciones simultáneas y actuar en ambientes hostiles a la persona.

Comunicación y mando

Emitir y recibir información y dar órdenes de mando forman parte de las actividades más relevantes de la relación de las personas con el entorno, las cuales se realizan fundamentalmente a través de la vista, el oído y el tacto (en algún caso se recurre a otros sentidos como, por ejemplo, el olfato para facilitar la detección de fugas de gas natural con la adición de sustancias de olor repulsiva).

Sistemas y dispositivos visuales. Una de las formas más completas y fiables de comunicación entre personas es a través del lenguaje escrito. Otros dispositivos de información visual son los indicadores, los diales y cuadrantes, los símbolos y las pantallas. La eficacia de los dispositivos visuales no depende solo del receptor sino también de condiciones externas (iluminación, distancia, reflejos, objetos interpuestos). Los mensajes visuales pueden ser extensos y permanecer en el tiempo, pero su capacidad para llamar la atención es baja y requieren una posición adecuada del receptor por lo que no son adecuados si implican una respuesta inmediata.

Sistemas y dispositivos sonoros. La mayor parte de las comunicaciones directas entre personas se realizan por medio de la voz. Otros dispositivos de información sonora son los altavoces, los timbres, las alarmas y las sirenas. No necesitan una posición determinada del receptor y, en general, llaman más la atención, pero requieren un ambiente sonoro adecuado y no son permanentes.

Sistemas y dispositivos táctiles. La percepción táctil se utiliza para reconocimientos en situaciones de baja luminosidad o para invidentes. En cambio, los dispositivos táctiles constituyen la mayor parte de los mandos de máquinas y sistemas (botones, pulsadores, teclas, interruptores y selectores rotativos, volantes y manivelas, palancas, pedales, ratón).

El diseño de los dispositivos de comunicación y mando son una de las tareas fundamentales de la intervención ergonómica. Debe asegurarse una correcta percepción de los mensajes, evitar confusiones o malas interpretaciones en los contenidos (se puede duplicar la información a través de dos sistemas distintos; por ejemplo, alarma sonora y mensaje visual por pantalla), conseguir una buena accesibilidad de los mandos y procurar que no produzcan cansancio o estrés en las personas.

Herramientas de simulación ergonómica

Una adecuada respuesta del diseño a las relaciones entre personas y máquinas tiene su base en los conceptos y métodos ergonómicos descritos en los apartados ante-riores. Sin embargo, como en otros campos de las técnicas aplicadas, cada día son más importantes las herramientas de cálculo y simulación.

Hoy día existen numerosos programas informáticos que, en base a extensas utilidades de modelado humano y la creación de escenarios en sistemas de CAD convencionales, permiten modelizar relaciones ergonómicas que respondan a una gran diversidad de criterios (antropométricos, biomecánicos y psíquicos), lo que constituyen verdaderas herramientas de simulación ergonómica.

Por un lado, estas herramientas permiten simular el funcionamiento ergonómico de un sistema o la medida de ciertos parámetros que de otra forma comportarían unos costes y unos tiempos muy importantes y, por otro lado, permiten detectar ciertos errores o dificultades que pueden corregirse en la etapa de diseño antes de la realización de los productos, máquinas o sistemas.

La intervención de personas con una buena formación ergonómica es la garantía para evitar errores en la interpretación de los resultados de la simulación y como en otras simulaciones, es recomendable realizar pruebas ergonómicas en condiciones reales para confirmar el comportamiento previsto.

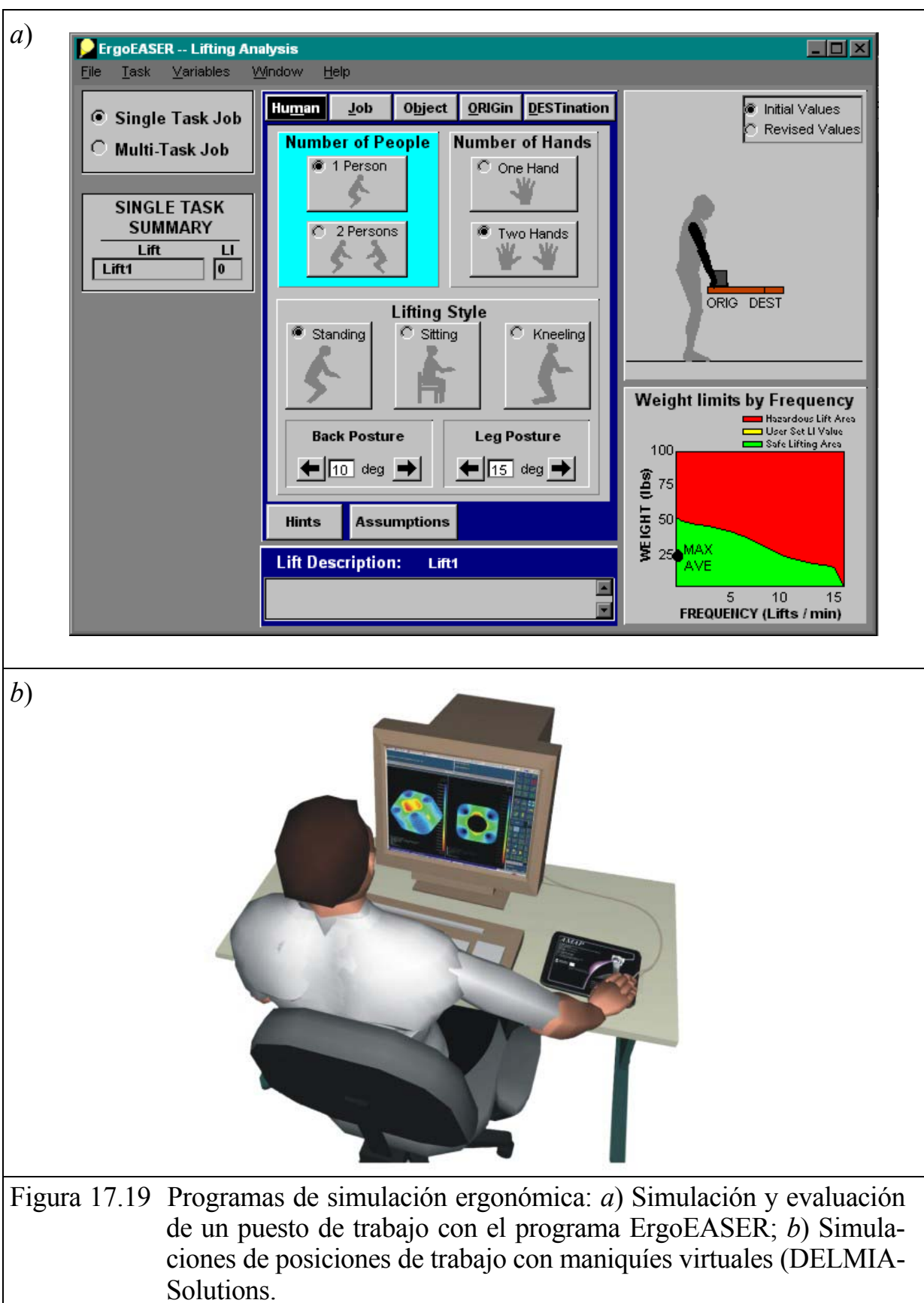
Las distintas herramientas de simulación ergonómica evalúan, entre otros aspectos:

Posturas y prensiones. En base a la definición de un escenario, con un maniquí virtual se pueden simular y evaluar posturas complejas, secuencias de movimientos, la prensión de objetos, acciones de mando u operaciones de mantenimiento. Algunos programas incorporan bases de datos antropométricos.

Manipulación de cargas. Definida una tarea, entre otros permiten simular y evaluar las manipulaciones de cargas pesadas, las manipulaciones repetitivas de pequeñas cargas, detectar posturas difíciles o inadecuadas y el consumo energético en base a alguno de los métodos más frecuentes (NIOSH, RULA, GARG).

Visualización de pantallas. Permiten evaluar el confort y la eficacia de la visualización de pantallas desde un puesto de trabajo. Los nuevos sistemas de fabricación flexible tienden a substituir los trabajos de manipulación por tareas de diseño y de control [Gue, 2001] donde el tiempo de permanencia frente a pantallas es cada día mayor (sistemas CAD/CAE en el diseño; sistemas CAD/CAM en la producción).

Uno de los retos más importantes en el futuro de los programas de modelización y simulación ergonómica es que se incorporen progresivamente en los grandes sistemas CAD 3D, como una herramienta más de apoyo a las tareas de diseño. Junto a ello, también deben difundirse los conceptos y las técnicas básicas de la ergonomía entre los diseñadores, como garantía de una correcta aplicación e interpretación de resultados. En todo caso, las situaciones inciertas o complejas deben ser resueltas por especialistas.



Seguridad de las máquinas

Si bien la seguridad de las máquinas había adquirido una atención y una importancia crecientes en el diseño de productos, máquinas y sistemas, con la entrada en vigor de la Directiva 89/392/CEE del Consejo de la Comunidad Europea y el consecuente despliegue normativo (especialmente, las normas EN 292-1/292-2 referentes a terminología básica, metodología, principios y especificaciones técnicas, y la norma EN 414 sobre las reglas para la elaboración de normas de seguridad), este tema se ha transformado en obligatorio.

La citada directiva europea y el Real Decreto 1425/1992 que establece las disposiciones para su aplicación a España, contienen los elementos básicos de toda la transformación conceptual y legal que se ha operado (y continúa desplegándose) alrededor de la seguridad en las máquinas.

En estas disposiciones se establece que sólo podrán comercializarse y poner en servicio las máquinas que no comprometan la seguridad ni la salud de las personas, animales domésticos ni bienes, para lo que deberán cumplir los *requisitos esenciales de seguridad y salud* contenidos en su anexo.

La simple enumeración de los requisitos esenciales permite percibir la importancia de este cambio de concepción en la seguridad de máquinas: principios de integración de la seguridad; materiales, productos y alumbrado; órganos de accionamientos, puesta en marcha, parada y parada de emergencia; medidas de seguridad contra peligros mecánicos (estabilidad, caídas, roturas, elementos móviles); resguardos y dispositivos de protección; medidas de seguridad contra otros peligros (eléctricos, temperatura, incendio, explosión, ruido y vibraciones, radiaciones); mantenimiento; indicaciones y dispositivos de información; y manual de instrucciones. También se dan indicaciones sobre algunas categorías de máquinas.

Dicho lo anterior, la directiva europea establece que sólo podrán comercializarse y ponerse en servicio las máquinas si no comprometen la seguridad ni la salud de las personas, ni de los animales domésticos ni de los bienes, cuando estén instaladas y mantenidas convenientemente y se utilicen de acuerdo con su uso previsto. En este punto se deslindan las responsabilidades entre el fabricante de la máquina y sus usuarios, de lo que se deriva la importancia del contenido de los manuales de utilización y de mantenimiento.

En caso de incumplimiento, la administración toma las medidas pertinentes que pueden llegar a ser la retirada de los productos del mercado y los responsables de las empresas fabricantes incurren en responsabilidades que pueden tener consecuencias legales e incluso penales. Las obligaciones sobre seguridad también afectan a los que comercialicen con máquinas cuyos fabricantes sean de fuera de la Comunidad Europea.

El contenido de estas disposiciones y normas no pueden ser expuestos en este texto. Sin embargo, es interesante seguir, aunque muy brevemente, algunos de los conceptos, reglas y métodos contenidos en ellas ya que aportan elementos de gran utilidad en el diseño de máquinas.

El concepto de máquina

Estas disposiciones parten de un concepto muy amplio de máquina, como un conjunto de piezas y órganos unidos entre sí, de los cuales uno por lo menos es móvil y en su caso, de órganos de accionamiento, circuitos de mando o de potencia, asociados de forma solidaria para una aplicación determinada y en particular, para la transformación, el tratamiento, el desplazamiento y el acondicionamiento de un material. También entran en esta definición un conjunto de máquinas que funcionan solidariamente y los equipos intercambiables que modifiquen el funcionamiento de una máquina.

Requisitos esenciales y estado de la técnica

Los requisitos esenciales de seguridad y salud contemplados en el anexo de la directiva son imperativos, si bien en algunos casos son difíciles de alcanzar. Cuando eso ocurra, la directiva establece que, en función del estado de la técnica, la máquina deberá diseñarse para acercarse al máximo a ellos.

El concepto de *estado de la técnica* permite no incorporar lo que está aún en fase de investigación mientras que obliga a adoptar lo que ya es del dominio común. En todo caso, el estado de la técnica está en continua evolución.

Ejemplo: Hace unos años el "airbag" estaba en fase experimental y se aplicaba en algunos vehículos de grandes prestaciones; hoy día está en el estado de la técnica.

Seguridad en todos los modos de operación

Las máquinas deberán ser aptas para realizar su función y mantenimiento sin que las personas se expongan a peligro siempre que las operaciones se lleven a cabo en las condiciones previstas por el fabricante (usos previstos y usos no previstos, contenidos en los manuales de utilización y de mantenimiento).

Las medidas que se tomen deben ir encaminadas a suprimir riesgos durante la vida útil previsible, incluidas las fases de montaje, desmontaje e inclusive cuando los riesgos se presenten en situaciones anormales pero previsibles.

Ejemplo: Introducir los dedos en un enchufe eléctrico es una situación anormal; sin embargo es previsible que un niño de corta edad lo haga.

Principios de seguridad

Al optar por las soluciones más adecuadas para la seguridad de las máquinas, el fabricante debe aplicar los siguientes principios y por el orden que se indica:

- Eliminar si es posible la causa del riesgo (*seguridad intrínseca*)
- Adoptar protecciones (*resguardos*)
- Y, en último caso, informar del riesgo a los usuarios

Ejemplo: En el *Caso 3.12* aparecen unos ejemplos de seguridad intrínseca y de la posible aplicación de un resguardo.

Órganos de accionamiento

La puesta en marcha de una máquina sólo debe poder efectuarse mediante una acción voluntaria ejercida sobre un órgano de accionamiento previsto a tal efecto. Este requisito también es aplicable después de una parada, sea cual sea la causa, o cuando haya una modificación importante de las condiciones de funcionamiento. También se regulan las máquinas con varios órganos de accionamiento, la parada y la parada de emergencia.

Caso 3.12

Accidente con una máquina de rayos X

Hace unos años en un hospital de Barcelona hubo un accidente grave (con muerte) causado por una máquina de rayos X fabricada con anterioridad a la publicación de la directiva.

Este tipo de aparatos consta de una plataforma horizontal (puede adoptar también ligeras inclinaciones hacia la cabeza o hacia los pies; posición A de la Figura 3.18), donde yace el paciente, sobre la cual se desplaza un brazo en cuyo extremo se articula la cámara de rayos X. El desplazamiento del brazo junto con el giro de la cámara permiten dirigir los rayos X a multitud de partes del cuerpo y en una gran variedad de inclinaciones. Justo debajo de la cama hay un elemento para realizar radiografías.

También están previstos otros usos de este aparato en los que la plataforma junto con el brazo y la cámara basculan hasta la posición vertical. En ellas, el paciente se puede colocar de pie, paralelamente a la plataforma (posición B de la Figura 3.20) o sobre una camilla, para lo cual hay que girar la cámara de rayos X 90° para orientarla hacia abajo (posición C de la Figura 3.18).

El funcionamiento en las posiciones A y B suele ofrecer una buena seguridad, ya que el movimiento del brazo y de la cámara son paralelos al paciente (seguridad intrínseca). Sin embargo, en la posición C, el movimiento del brazo y de la cámara van al encuentro del paciente por lo que son posibles maniobras fortuitas que conlleven un importante peligro (en este tipo de utilización no se da la seguridad intrínseca). En efecto, la baja velocidad del movimiento y la importante desmultiplicación de la reducción mecánica hacen que el cabezal con la cámara de rayos X pueda llegar a ejercer una fuerza de más de 5000 N.

En este caso, un movimiento fortuito del brazo aplastó al paciente, lo que habría podido evitarse si el fabricante hubiera incorporado un sistema de detección y paro en caso de que la cámara entrara en contacto con el paciente (resguardo).

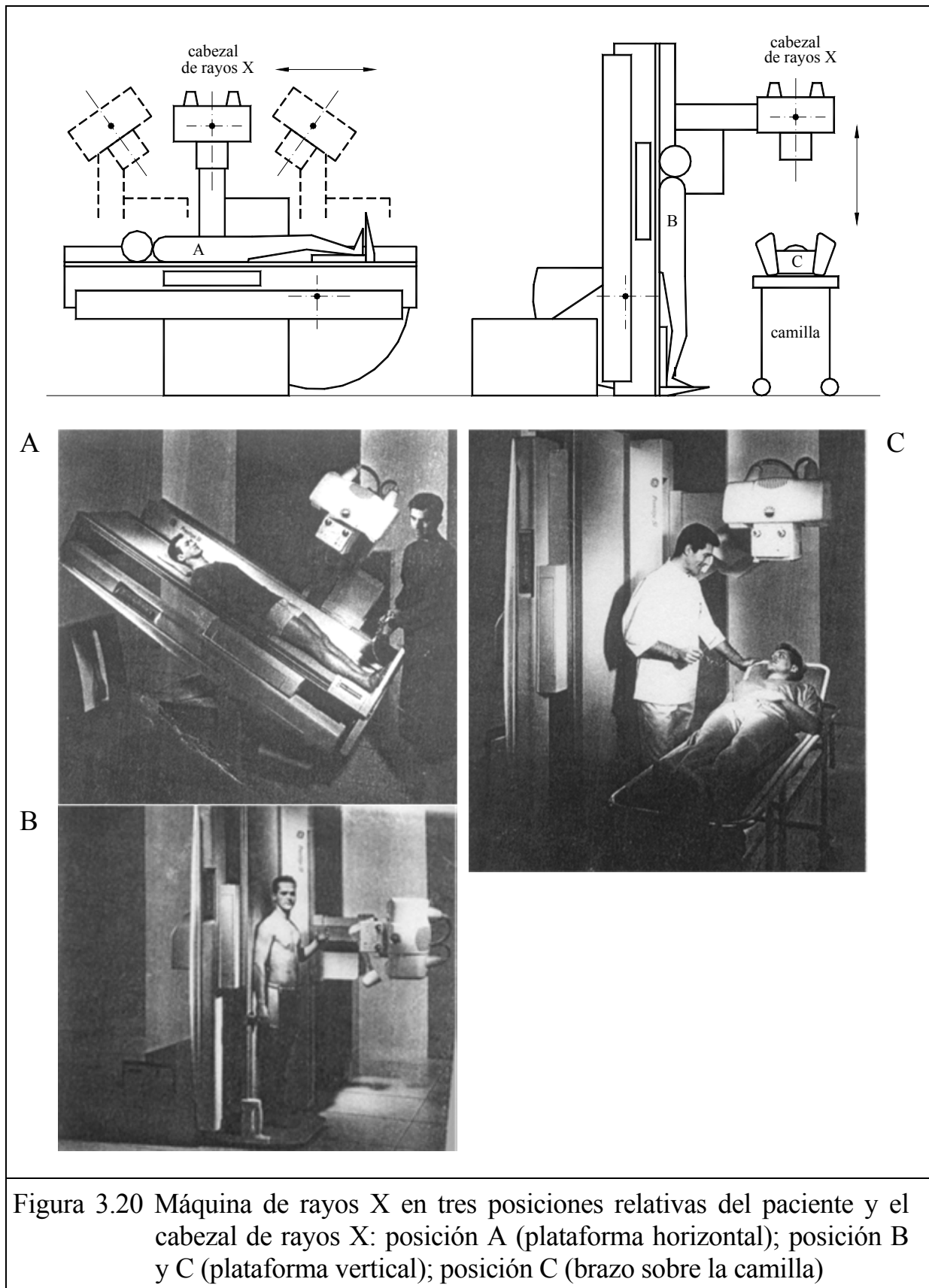


Figura 3.20 Máquina de rayos X en tres posiciones relativas del paciente y el cabezal de rayos X: posición A (plataforma horizontal); posición B y C (plataforma vertical); posición C (brazo sobre la camilla)

Impactos ambientales y fin de vida

De entre los aspectos del entorno, los *impactos ambientales* son probablemente los que más interés y atención están suscitando en los últimos tiempos. En efecto, hay que asegurar que los productos y las máquinas no produzcan agresiones al medio en ninguna de las etapas del *ciclo de vida*:

- Ni a causa de las materias primas
- Ni en su producción
- Ni durante su distribución y comercialización
- Ni en su utilización, ni en el mantenimiento
- Ni en su fin de vida

Se analiza la incidencia de las diferentes alternativas en el medio ambiente, etapa a etapa y en su conjunto. Entre los aspectos a tener en cuenta y las acciones a emprender, están:

- a) Controlar los consumos de energía
- b) Evitar las emisiones a la atmósfera
- c) Evitar la contaminación de las aguas
- d) Evitar la contaminación sonora
- e) Evitar las radiaciones
- f) Evitar los productos nocivos para la salud
- g) Prever la reutilización o el reciclaje.

La problemática del medio ambiente sobrepasa el alcance de este texto. Sin embargo, se trata con cierta extensión el tema del *fin de vida* por las conexiones e implicaciones que tiene con el diseño.

Etapas en las conciencias sobre el entorno

Hasta épocas relativamente recientes no se ha tomado conciencia de la incidencia de la actividad del hombre sobre los recursos naturales y de la necesidad de establecer medidas para limitar las agresiones al medio ambiente. Esta preocupación por el entorno se ha ido enriqueciendo con nuevos temas y sensibilidades:

- A mediados de los años 1970 la crisis del petróleo acabó con el mito de la energía barata y puso de manifiesto la necesidad, por un lado, de ahondar en el ahorro energético y, por el otro, de desarrollar energías alternativas renovables.
- En los años 1980 aumenta la conciencia y las acciones encaminadas a la protección del medio ambiente (contaminación de la atmósfera, de las aguas, de los mares y los ríos, contaminación acústica).
- La década de los años 1990 amplía esta conciencia y estas acciones a la necesidad de reciclar los materiales escasos (especialmente los plásticos en las industrias del embalaje y de la automoción).

- Finalmente, con la entrada en el siglo XXI llega la consciencia sobre el impacto de la combustión de los carburantes fósiles sobre el cambio climático, de imprevisibles consecuencias, así como la preocupación sobre fenómenos transnacionales relacionados con los alimentos y la salud.

La atención sobre los impactos al entorno ha ido ampliando el campo desde las etapas de fabricación y utilización hacia la etapa del *fin de vida*

A nivel normativo se produjo un importante giro cuando ISO creó en 1993 el nuevo comité técnico TC 207 sobre gestión ambiental, cuyo resultado son las normas ISO 14000 (hoy día, más de 20) sobre *sistemas de gestión ambiental*.

De entre estas normas, las que tienen más incidencia en el diseño de productos (y servicios) son la ISO 14040 y conexas que tratan del *análisis del ciclo de vida* (ACV; en inglés, LCA, *life cycle assessment*), o estudio de la relación entre los sistemas tecnológicos (productos, servicios) y el medio ambiente como base para tomar medidas orientadas a un desarrollo más sostenible teniendo en cuenta las veetientes ambiental, social y económica.

Formas de fin de vida

En función de consideraciones técnicas, económicas y éticas, hay diversas formas de poner fuera de uso los productos que han llegado al fin de su vida útil. Cada una de ellas tiene distinta incidencia en el entorno y distintas implicaciones en la concepción del producto. A continuación se definen brevemente estas alternativas, estableciendo el orden de mayor a menor exigencia en el rigor y en correspondencia, de menor a mayor incidencia al medio ambiente:

Reutilización

Consiste en recuperar el conjunto de un producto, o determinadas partes, para darles un nuevo uso, una nueva utilización. Por ejemplo:

- a) La recuperación de componentes para recambios en los desguaces
- b) La reutilización de material informático en desuso para tareas de docencia
- c) La reutilización de neumáticos triturados para nuevos pavimentos de carreteras

En general, la reutilización es la forma que menor impacto tiene en el entorno, excepto si mantienen en uso productos basados en tecnologías muy contaminantes o consumidoras de energía.

La reutilización, en general, está limitada a determinados tipos de productos y hoy día se hace difícil aplicarla de forma generalizada por la rápida obsolescencia que provoca el cambio tecnológico. Sin embargo, en los países desarrollados convenría revisar los conceptos de productos de *un-solo-uso*, de *usar-y-tirar*, o las formas de mantenimiento basadas en substituir en lugar de reparar.

Reciclaje

Consiste en recuperar los materiales de los productos a su fin de vida para volverlos a utilizar como a materia prima en un nuevo proceso. Per ejemplo:

- a) El reciclaje del cobre de las conducciones eléctricas
- b) El reciclaje del vidrio, por fundición y nueva conformación

En el reciclaje de ciertos materiales se producen degradaciones debidas a mezclas (aluminio), o contaminación y degradación de propiedades (muchos polímeros).

Tanto las uniones íntimas entre materiales (composites, plásticos con insertos metálicos, chapas con recubrimientos encolados) como la diversidad de composiciones y aleaciones, dificultan en gran medida las posibilidades de reciclaje.

A pesar de ello, el *reciclaje* de materiales (los metálicos de forma más fácil y los polímeros con más dificultad) constituye hoy quizás la forma más prometedora de resolver el *fin de vida* de los productos. En determinados casos el reciclaje viene forzado por los efectos contaminantes de los materiales (pilas, aceites usados)

Recuperación de energía

Consiste en extraer por medio de combustión el contenido energético de determinados tipos de materiales (papel, tejidos, maderas, plásticos, líquidos combustibles). El volumen y peso del material a eliminar se reduce enormemente, pero queda un residuo (cenizas) que hay que eliminar en un vertedero. Por ejemplo:

- a) La combustión de residuos urbanos con un alto contenido de embalajes
- b) La combustión de restos de madera de una serradora

La combustión de mezclas de composición incontrolada (como los residuos urbanos) produce gases altamente contaminantes que inciden en la atmósfera, las aguas y los bosques, efectos que difícilmente pueden ser eliminados por completo con los modernos sistemas de filtrado. En este sentido, el Parlamento Europeo ha iniciado medidas para la recogida específica del PVC a fin de evitar sus efectos contaminantes, especialmente en la combustión.

En algunos casos, la recuperación de energía puede ser una buena solución.

Vertido

Es el más sencillo recurso para la eliminación de los productos en su fin de vida. Exige una preparación del terreno para impermeabilizarlo y el control de sus vertidos, circunstancias que a menudo no se dan. Una instalación bien gestionada comporta el llenado por capas alternativas de vertidos y tierras compactadas y la existencia de un depósito para la recogida de lixiviados.

Los vertederos suelen presentar impactos importantes (contaminación de aguas superficiales y subterráneas; malos olores; impacto paisajístico) y por lo tanto, deben ser considerados como un último recurso. Hay que evitar tirar materiales susceptibles de reutilización o reciclaje (muchos vertederos van a ser verdaderas "minas" cuando escaseen determinados materiales en el futuro).

La problemática del fin de vida

Nuestra sociedad ha creado numerosas necesidades que son cubiertas por una gran variedad de productos que se producen en cantidades muy elevadas. Por ejemplo:

- Equipo doméstico: frigoríficos, lavadoras, televisores, hornos microondas
- Medios de transporte: automóviles, motocicletas, bicicletas
- Equipos de oficinas y administraciones: ordenadores, impresoras, teléfonos
- Equipos industriales: máquinas herramientas, útiles, sistemas de mantenimiento
- Equipos para la construcción: calefacciones, ascensores, sistemas de seguridad

Estos productos y equipos tienen una vida útil que se puede cifrar entre 3 hasta 20 años, lo que origina con el paso del tiempo unos volúmenes crecientes de productos que llegan a su fin de vida.

Por ejemplo, hacia finales del siglo XX el parque mundial de automóviles era ya superior a los 500 millones de unidades y, el europeo, superior a 150 millones. Tomando una media de vida útil de unos 10 años y, considerando que el mercado europeo es maduro (fundamentalmente de reposición), en Europa llegan de forma difusa y silenciosa a su fin de vida unos 15 millones de vehículos por año.

Ello representaría llenar unos 15.000 estadios de fútbol hasta una altura de 10 metros de automóviles sin compactar y el reto de reciclar unas 18 millones de toneladas de materiales con la composición aproximada siguiente: 13 de ellas de acero; 2 de aluminio y otros metales; 1,5 más de plásticos; otras 0,9 de cauchos y elastómeros; y finalmente 0,6 millones de toneladas de vidrio.

Si se fuera analizando el fin de vida de otros productos (televisiones, frigoríficos, ordenadores, teléfonos móviles) los resultados vendrían a confirmar lo dicho para el automóvil, a la vez que se percibiría la importancia que el tema del fin de vida va adquiriendo en los países desarrollados.

Materiales y reciclabilidad

Consideraciones iniciales

Como se ha dicho, el reciclado de materiales parece ser uno de los caminos que ofrece más posibilidades en el tratamiento del *fin de vida* de los productos.

Hasta la primera mitad del siglo XX el reciclaje de productos había sido muy alto gracias a unas tecnologías más simples y a unos materiales menos variados y de fácil reciclaje (hierro, cobre, madera, tejidos, papel).

Sin embargo, la creciente complejidad de los productos, la irrupción de nuevos materiales (especialmente los plásticos), la proliferación de piezas y componentes que combinen varios materiales y, sobretodo, el aumento de las producciones, han perturbado notablemente los esquemas de fin de vida existentes hasta entonces.

La problemática que existe en relación a poner en práctica políticas de reciclaje de materiales es la siguiente:

- a) Hay que poner a punto procesos de reciclaje efectivos, económicos y respetuosos con el medio ambiente para los nuevos materiales, especialmente los derivados de polímeros (plásticos y elastómeros).
- b) Hay que crear mercados, canales de distribución y empresas especializadas para la recogida, el tratamiento y sobretodo para la nueva utilización de los materiales reciclados.
- c) Las iniciativas que se implanten en relación con el diseño para el reciclaje tardarán entre 3 y 10 años (dependiendo de los productos) en dar frutos sobre el reciclaje.

Reciclaje de los plásticos

La recuperación económica de los materiales plásticos está directamente relacionada con la facilidad de desmontaje, el volumen de material recuperado por pieza, el tiempo de descontaminación, en su caso, y el valor del material.

En primer lugar, hay que distinguir entre materiales termoplásticos, que pueden ser conformados de nuevo por fusión y moldeo, y materiales termostables que una vez polimerizados no pueden cambiar de forma por fusión y que, en todo caso, sufren una degradación con la temperatura.

Sin embargo, hay que matizar la buena reciclabilidad de los termoplásticos y la mala reciclabilidad de los termostables por las siguientes razones:

- a) Los termoplásticos no ofrecen buena reciclabilidad cuando forman aleaciones, cuando presentan cargas de diversos tipos (fibras, plastificantes, materiales de relleno) o cuando están contaminados (absorción de líquidos por depósitos, pinturas, recubrimientos).
- b) Los termoplásticos tampoco se reciclan con facilidad cuando forman parte de estructuras con varios componentes (materiales compuestos, insertos metálicos, componentes obtenidos por coextrusión o por inyección-sandwich).
- c) Para un reciclado rentable de los termoplásticos deben de recogerse piezas de dimensiones mínimas (la industria de la automoción ha fijado 100 g), y el material debe ser identificado con facilidad.
- d) Por otra parte, se están realizando estudios para reutilizar materiales termostables a partir su fraccionamiento, como carga para materiales compuestos.

Gracias a sus bajas densidades los materiales plásticos tienen en general una repercusión beneficiosa en ahorro de energía en aplicación de automoción y transporte (un automóvil incorpora unos 100 kg de plástico que substituyen unos 700 kg de acero).

Reciclaje del aluminio

Cada día es un material más importante en la fabricación de productos, máquinas y sistemas debido a sus interesantes propiedades.

En efecto, presenta unas relaciones resistencia/peso y rigidez/peso no muy distintas a las del acero, la alta resistencia a la corrosión, la gran versatilidad en la conformación (fundición, inyección; forja, laminado, extrusión; mecanizado; anodizado; tratamientos térmicos), una buena conductividad eléctrica (usos eléctricos) y térmica (intercambiadores de calor, disipadores de energía) y, también, por su buena reciclabilidad.

Respecto a la reciclabilidad hay que comentar dos aspectos distintos:

- a) La primera obtención del aluminio por electrólisis a partir de la bauxita es muy costosa energéticamente (más que el acero); sin embargo, el proceso de reciclaje absorbe sólo el 5% de esta energía inicial. Ello significa que es un disparate energético diseñar productos en aluminio sin pensar en su reciclaje.
- b) Las aleaciones de aluminio suelen tener composiciones relativamente elevadas de otros materiales (silicio, cobre, magnesio, cinc), por lo que la identificación de la aleación puede ser una facilidad en el reciclaje.

De forma análoga a los plásticos, la baja densidad del aluminio proporciona indirectamente mejoras en el medio ambiente en vehículos y sistemas de transporte a causa del menor combustible requerido.

Criterios para una nueva ecocultura del diseño

De todo lo dicho anteriormente se desprende que se está andando hacia una nueva concepción del diseño que tenga en cuenta las afectaciones al medio ambiente y de forma destacada, la problemática del fin de vida.

Aunque esta nueva ecocultura del diseño no ha hecho más que andar los primeros pasos, se han consolidado ya algunos criterios y principios que se exponen a continuación:

a) Orientar el diseño hacia el reciclaje y la reutilización

Uno de los criterios que se van estableciendo es el de diseñar para el reciclaje y la reutilización para evitar la incineración y el vertido. El diseño para el reciclaje pone énfasis en aquellos aspectos que hacen posible la recuperación de los materiales y su nueva utilización en los procesos productivos, mientras que la reutilización propugna aumentar los segundos usos de los productos o partes de ellos. Los puntos *b)* y *c)* van destinados a facilitar el reciclaje, mientras que el punto *d)* mejora tanto el reciclaje como la reutilización.

b) *Simplificar y estandarizar los materiales*

En la perspectiva del ecodiseño, las nuevas recomendaciones respecto a los materiales pueden ser contradictorias con las tendencias hasta el momento:

- Reducir la cantidad de material usado (siempre es beneficioso)
- Reducir la variedad de materiales usados (puede oponerse a criterios tradicionales de optimización)
- Eliminar, o reducir, las aleaciones y las mezclas, así como soluciones que comportan la imbricación íntima de materiales distintos.

c) *Identificar los materiales*

Consiste en añadir una marca o indicación sobre las piezas a partir de un ciertas dimensiones de la pieza que permita la inmediata identificación por parte de los operarios de desguace. Este aspecto tiene interés especialmente en los termoplásticos y las aleaciones de aluminio. Diversas industrias ya lo aplican.

d) *Facilitar el desmontaje y el desguace*

Después de hacer tanto énfasis en el diseño para el montaje, ahora también hay que hacerlo para el desmontaje. Los principales puntos de este apartado son:

- Establecer la estructura modular de los productos no tan solo orientada hacia la fabricación, sino también al desmontaje para el reciclaje o la reutilización.
- Avanzar en la creación de nuevos tipos de uniones que permitan fácilmente la separación de componentes (aunque sea por rotura de las zonas débiles previstas a tal efecto), así como las uniones entre partes de materiales distintos.

e) *Diseñar para la reutilización*

Este criterio es el que proporciona impactos ambientales menores, por lo que deben seguirse las siguientes indicaciones:

- Debe diseñarse, en lo posible, para la reutilización. Hay que revisar la aplicación de los conceptos de productos de *un-solo-uso* o de *usar-y-tirar*, a la vez que, en mantenimiento dar una mayor prioridad a la reparación frente a la simple substitución.
- Estandarizar piezas y componentes como medida para facilitar la reutilización.
- Fomentar los mercados de reparación y reutilización de grupos y darles un mayor contenido técnico.

Quizás algunos de estos criterios y recomendaciones con el tiempo van a tomar mayor relieve, mientras que otros serán dejados de lado. En todo caso, esta nueva *ecocultura del diseño* será uno de los aspectos que requerirán mayor atención y más imaginación en la perspectiva de la *ingeniería concurrente*.