
2 Estructuración del diseño

2.1 Metodología de las ciencias y de las tecnologías

Introducción

Una gran parte de los productos y servicios más innovadores que se han desarrollado recientemente están fuertemente relacionados con investigaciones científicas. Por ello, muchas personas suelen considerar que estos productos y servicios no son más que una aplicación práctica de los conocimientos científicos y suele olvidar que la mayoría de los nuevos descubrimientos de la ciencia han requerido importantes desarrollos tecnológicos en aparatos y procesos sofisticados para llevar a buen término los trabajos de experimentación.

No se trata de dilucidar cuáles de las dos son más importantes, si las ciencias o las tecnologías, ya que ambas se complementan y se necesitan y hoy día, serían impensables las unas sin las otras. Sin embargo, se ha producido una confusión generalizada en relación a las metodologías de las ciencias y de las tecnologías por lo que la observación hecha al inicio de este apartado no es baladí.

En efecto, el mayor predicamento de las ciencias en los medios de comunicación, en los ámbitos académicos y en los centros de formación tanto científicos como tecnológicos, ha llevado a pensar que la metodología de la investigación experimental (de larga tradición) cubre tanto las actividades científicas como los desarrollos en la ingeniería.

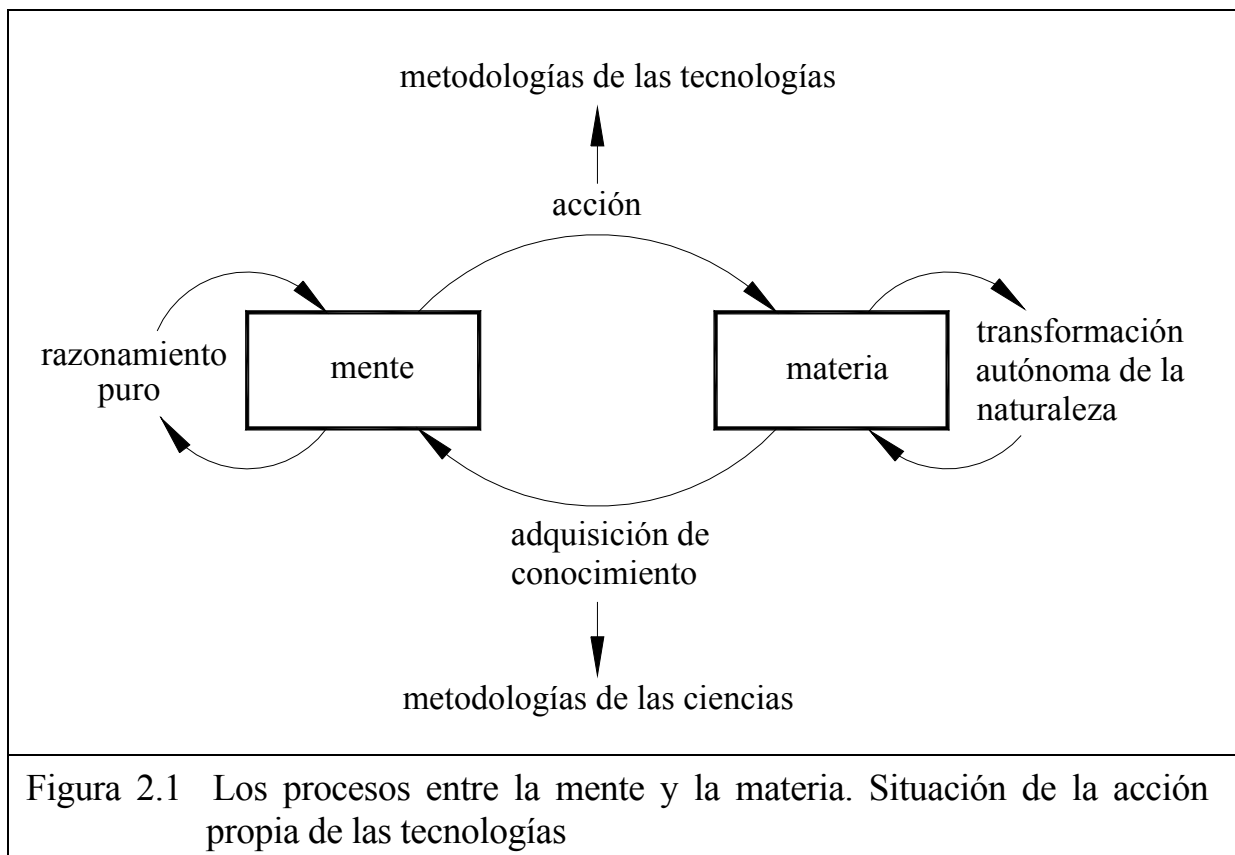
Estas circunstancias han hecho que, hasta tiempos muy recientes, se haya prestado muy poca atención a las metodologías propias de las tecnologías y de forma destacada dentro de ellas, las de diseño. Sin embargo, desde hace poco más de dos décadas, cada vez es más abundante la literatura sobre las bases y los conceptos de la metodología para las actividades tecnológicas y de diseño.

Experimentación y diseño

Los humanos vivimos en dos mundos que están en continua interacción: el mundo material (de fuera, exterior) de objetos tangibles y hechos observables y el mundo mental (de dentro, interior) de conocimientos, pensamientos, opiniones, sensaciones, deseos y voluntades.

Esta interacción puede tener dos sentidos: *a)* Un proceso básicamente dirigido de *fuera-a-dentro* que procura obtener imágenes o representaciones mentales del mundo físico (*adquisición de conocimiento*; la investigación experimental, base metodológica de las ciencias, es una de sus formas sistematizadas); *b)* Otro proceso básicamente dirigido de *dentro-a-fuera* que, a partir de construcciones mentales (ideas, deseos, voluntades) tiene por objeto producir cambios en el mundo físico (*acción*; las tecnologías y en concreto el diseño, son también una de sus formas sistematizadas).

Además de los procesos descritos, existen dos procesos más que no entran directamente en los objetivos de este trabajo: *c)* Un proceso de *dentro-a-dentro* en el dominio de la mente (*razonamiento puro*; matemáticas, lógica); *d)* Y, otro proceso de *fuera-a-fuera* en el dominio físico (*transformación autónoma de la naturaleza*), donde no interviene la mente humana (ver Figura 2.1)



Las diferencias entre los objetivos de las ciencias experimentales y de las tecnologías hacen que también sean diferentes las metodologías que apoyan sus actividades. Así pues, los sistemas tecnológicos no son el resultado de investigaciones experimentales (aunque se basen en ellas), sino de la aplicación metódica de unas actividades con entidad propia que se inscriben en el *proceso de diseño* y que forman parte del objetivo del presente texto.

Más allá del distinto sentido de la interacción entre mente y realidad, los procesos básicos de la investigación experimental y del diseño responden a una misma estructura organizada en pasos con características análogas y que se denominan:

- *Ciclo básico de investigación experimental*
- *Ciclo básico de diseño*

En este mismo capítulo (Sección 2.2) se analiza con detalle el ciclo básico de diseño para más adelante, establecer un análisis comparativo entre el ciclo básico de diseño y el ciclo básico de investigación experimental.

Metodología y métodos

Se entiende por *metodología* el estudio del conjunto de *métodos* que utiliza una determinada rama del pensamiento o de la actividad humana. A continuación se define el concepto de método y se establece la división entre *métodos algorítmicos* y *métodos heurísticos* de interés para la materia tratada en este texto.

Método

Es una forma de proceder específica y ordenada para llegar a un determinado fin. Sus principales características son: *a)* Es un procedimiento racional; *b)* Es un procedimiento general, aplicable a cualquier caso particular; *c)* Es observable y reproducible por cualquier persona. Los métodos se pueden clasificar en:

Métodos algorítmicos

Basados en algoritmos, o sea, un conjunto no ambiguo de reglas que deben ejecutarse en el orden prescrito y que tienen por objeto conseguir un resultado claramente descrito. Son propios de las investigaciones experimentales.

Métodos heurísticos

Métodos exploratorios para el planteamiento y resolución de problemas en los que se avanza en las soluciones por medio de la evaluación de los progresos realizados. Por ello, se definen fuera del marco de referencia de la investigación experimental y no garantizan necesariamente un resultado. Son propios del diseño.

En general, las reglas o métodos que no pueden ser formulados por medio de algoritmos, son heurísticas.

Metodologías de diseño

Los artesanos concebían al mismo tiempo aquello que construían. Sin embargo, con el aumento de los volúmenes de producción y de la complejidad de los productos y procesos productivos, las tareas de creación (o de diseño) fueron requiriendo una atención y unos conocimientos técnicos cada vez más especializados de manera que el sistema productivo las fue separando, en el tiempo y en el espacio, de las actividades de fabricación.

Las actividades de *diseño* (separadas de las de producción) consisten, pues, en transformar unas necesidades o una idea, en una propuesta de producto y expresarlo en una forma que pueda ser materializado. Hay que destacar que el resultado del diseño no se deduce de forma unívoca de las premisas o funciones que debe cumplir y que, normalmente, existe una multiplicidad de buenas soluciones.

Las actividades de *desarrollo* (que incluyen las de diseño), también previas al lanzamiento del producto, tienen por objeto preparar el entorno productivo para hacer posible su fabricación y comercialización. La viabilidad de un producto, además de basarse en una buena idea y un buen diseño, depende de que disponga de un volumen suficiente de potenciales clientes o usuarios que permitan financiar las actividades de desarrollo.

Como se ha dicho en el Capítulo 1, las actividades del diseño han ido en aumento durante los últimos años asumiendo nuevas funciones de coordinación y responsabilizándose de una parte cada vez mayor de las tareas de ingeniería. Así pues, la reflexión sobre las metodologías de diseño toma una nueva dimensión estratégica, en especial cuando se destinan a sus tareas (y, sobretodo, se comprometen en su desarrollo) recursos humanos, materiales y de tiempo cada vez más mayores.

A continuación se definen los conceptos de *producto*, *diseño*, *desarrollo* y *metodología de diseño* para más adelante describir los distintos niveles de estructuración de los procesos de diseño y desarrollo.

Definiciones y conceptos

Producto

Es un resultado de la actividad del hombre (en el contexto de esta obra, un objeto, aparato, máquina o sistema; en otros contextos, también un material o un servicio) concebido y realizado para satisfacer alguna de sus necesidades.

Diseño

Conjunto de actividades destinadas a concebir y definir un producto en todas las determinaciones necesarias para su posterior realización y utilización. El resultado final se expresa por medio de documentos, entre los cuales hay dibujos técnicos.

Desarrollo

Conjunto de actividades destinadas a articular un negocio o servicio a la colectividad alrededor de un nuevo producto. Además de su diseño, el desarrollo de un producto incluye el planeamiento, la organización y la ejecución de las actividades financieras, productivas y comerciales necesarias para su lanzamiento o su puesta en servicio.

Metodología de diseño

Es el estudio de los métodos que tienen aplicación a las actividades de diseño y que responden a dos cuestiones principales: *a) ¿Qué hacer?* Son las *metodologías descriptivas de diseño* que intentan poner de manifiesto los métodos utilizados en el diseño a través de observar lo que hacen los diseñadores; *b) ¿Cómo hacer?* Son las *metodologías prescriptivas de diseño* que, a partir de opiniones basadas en un análisis descriptivo, recomiendan la aplicación de ciertos métodos para determinados problemas, así como también construye nuevos métodos cuando los que se dispone no son satisfactorios.

Niveles de estructuración de los procesos de diseño y desarrollo

La literatura especializada distingue tres tipos de modelos, cada uno de los cuales se aplica sobre un determinado ámbito y aporta una visión específica sobre una dimensión diferente de las actividades relacionadas con el diseño:

Modelo del Ciclo básico de diseño

Forma específica del método general de resolución de problemas orientado a la resolución del problema de diseño. Es un ciclo fundamental que se puede aplicar de forma iterativa a distintas etapas (iniciales, intermedias o finales) del proceso de diseño. Existe una excelente descripción del ciclo básico de diseño en la obra de Roozenburg & Eekels [Roo, 1991].

Modelo de etapas del proceso de diseño

Este modelo comprende tan solo el diseño del producto y establece las etapas del problema a resolver y la secuencia más recomendable para llevarlas a término. Fundamentalmente se establecen las etapas de especificación, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. Esta aproximación la adoptan, entre otros, French [Fre, 1985], Pahl & Beitz [Pah, 1984] y la norma de los ingenieros alemanes VDI 2221.

Modelo de etapas del proceso de desarrollo

Este modelo comprende tanto el diseño del producto como la planificación de las actividades de producción y comercialización hasta el inicio de su fabricación e incluye etapas como el estudio de mercado, la planificación estratégica, el diseño del producto y del proceso, la fabricación de los medios de producción y el lanzamiento de la fabricación y la comercialización. Esta aproximación ha sido adoptada, entre otros, por Archer [Arc, 1971].

2.2 Ciclo básico de diseño

Método de resolución de problemas

Existe un problema cuando alguien quiere lograr unos objetivos y los medios para conseguirlo no son obvios de forma inmediata. En general, los problemas son abiertos y se dispone de una gran libertad en la elección de los medios a utilizar y una gran diversidad en los caminos a recorrer. La resolución de problemas es el método por el cual estos medios y caminos se buscan intencionadamente y en donde es importante el procedimiento de prueba-error.

En todas las variantes de resolución de problemas se pueden reconocer las siguientes actividades: examen–suposición–expectativa–comprobación–resolución. El ciclo empieza con el examen de la situación sobre la que se opera, continúa con el establecimiento de suposiciones sobre las acciones que pueden resolver el problema basándose en el aprendizaje de ciclos anteriores para extraer las expectativas que se derivan de ellas, después confronta estas expectativas con el problema examinado y finalmente considera el resultado del proceso a efectos de resolver su continuación.

Algunas de las características de los métodos de resolución de problemas son:

- Las soluciones generadas son tentativas para, más adelante, evaluar sus efectos y tomar medidas correctivas
- Las soluciones no suelen hacerse realidad antes de completar el ciclo de resolución sino que, normalmente, los procesos se articulan en el dominio mental
- La búsqueda de la solución se realiza normalmente en forma de espiral convergente, o sea, con sucesivas interacciones del ciclo básico que proporcionan soluciones del problema cada vez mejores.

Ciclo básico de diseño

El *ciclo básico de diseño* es una forma particular del método de resolución de problemas cuyas actividades se dirigen desde los objetivos (las *funciones*) hacia los medios (el *diseño*). El ciclo básico de diseño utiliza una terminología propia con contenidos específicos en varios de sus pasos:

Análisis

El primer paso parte del enunciado del *problema* y, en base al *análisis* de las funciones técnicas, sociales, económicas, psicológicas o ambientales del producto o servicio, las formula en *especificaciones* (ver Sección 2.4) que deben guiar los pasos siguientes y constituirán los criterios para evaluar las soluciones futuras.

Las actividades que lleva a término el diseñador (o equipo de diseño) para formarse una idea del problema (el análisis) son esenciales en el proceso de diseño. Deben orientarse a determinar sus posibilidades y límites y a depurar las especificaciones para que, en lo posible, formen un sistema suficiente y no redundante.

Síntesis

El segundo paso consiste en la generación de una o más propuestas de solución (*diseños iniciales*, aún no simulados ni evaluados) a partir de la combinación de distintos elementos, ideas y filosofías de diseño (*síntesis*) para formar conjuntos que funcionen como un todo y que respondan adecuadamente a las *especificaciones*.

Aunque la síntesis (donde la creatividad humana es decisiva) abre las posibilidades de generación de alternativas y aumenta las perspectivas de solución, el ciclo básico de diseño constituye una unidad que tan sólo ofrece todos sus frutos si las actividades creativas están bien articuladas y apoyadas en el resto de actividades del ciclo (análisis, simulación, evaluación y decisión).

Simulación

El tercer paso consiste en obtener los *comportamientos* de los *diseños iniciales*.

Dado que estos diseños iniciales suelen estar definidos por unos modelos (estructura funcional, principios de funcionamiento, planos de definición) no siempre adecuados para estudiar sus comportamientos, la *simulación* se convierte en una actividad compleja que comprende dos semipasos diferenciados y varios caminos posibles a recorrer:

El primer semipaso consiste en establecer modelos adecuados de los diseños iniciales (*prototipos* virtuales o físicos) representativos de uno o más de sus aspectos mientras que el segundo semipaso consiste en obtener el comportamiento de estos prototipos (*simulación* propiamente dicha) por medio de la deducción o del ensayo. Algunos de los caminos posibles a recorrer son: *a)* La realización de prototipos virtuales (habitualmente con modelos informáticos) y la obtención de sus comportamientos (normalmente con herramientas informáticas de asistencia); *b)* La construcción de prototipos físicos (totales o parciales, detallados o simplificados) y la obtención de sus comportamientos mediante ensayos; *c)* Para ciertos aspectos relacionados con los juicios de valor (por ejemplo, la estética u otras percepciones), la simulación de los diseños iniciales puede basarse en encuestas de opinión o en experiencias cualificadas.

Evaluación

Consiste en establecer la utilidad, la eficacia, la calidad y la aceptación de las soluciones candidatas (*valor de los diseños*) en base a contrastar los comportamientos de los prototipos de los diseños iniciales obtenidos por simulación, ensayo u opinión, con las *especificaciones* establecidas anteriormente.

En el ciclo básico de diseño, más allá de contrastar el comportamiento real con el deseado, la evaluación debe ponderar el comportamiento global de distintos aspectos de los diseños candidatos a efectos de su comparación y posterior selección.

Decisión

Una vez evaluados los comportamientos de las soluciones candidatas (*valor de los diseños*) hay que determinar la alternativa a seguir (*decisión*):

a) Elegir un diseño inicial (se convierte en *diseño aceptado*, origen de la etapa siguiente del proceso de diseño, o de la fabricación); b) Establecer una nueva iteración en una de las etapas anteriores (normalmente el análisis del problema o la síntesis de soluciones) con la incorporación de determinadas propuestas de mejora; c) En casos extremos (resultados muy desfavorables y falta de nuevas perspectivas) abandonar el diseño.

Comparación entre los ciclos básicos de diseño y de investigación experimental

Los dos ciclos básicos corresponden a casos particulares de la metodología de *resolución de problemas*, por lo que su estructura es la misma a pesar de que las acciones concretas en cada uno de sus pasos diverjan en su contenido.

Dos problemas distintos

Los dos se inician con un problema (una necesidad, un desconocimiento) que exige un cambio para que la situación sea más satisfactoria.

El problema de partida del diseño es que determinados hechos y situaciones de la realidad no satisfacen nuestras necesidades, valores o preferencias. El objetivo del ciclo básico de diseño es, pues, a través de una acción y de unos medios técnicos, crear unas condiciones materiales que se ajusten más a nuestros requerimientos. La acción va del dominio mental en el área de los juicios de valor al dominio material. El problema de partida de la investigación experimental es el conocimiento insuficiente para explicar determinados hechos empíricos. El objetivo del ciclo básico de investigación experimental es establecer *hipótesis* que proporcionen predicciones más ajustadas a los hechos. La adquisición de conocimiento va del dominio material al dominio mental en el área del razonamiento sobre los hechos.

Análisis frente a observación

En el ciclo básico de diseño, el *análisis* se basa en juicios de valor inherentes a la formulación del problema y se dirige a establecer los criterios para crear un producto o un servicio en un mundo posible pero a la vez más deseable.

En el ciclo básico de investigación experimental la *observación* parte siempre del dominio material y, asistida o no por instrumentos y pruebas, establece de la forma más objetiva posible (reproducible por cualquier persona) los hechos observados.

Síntesis frente a inducción

La *síntesis* es el paso del ciclo básico de diseño en que se construyen soluciones al problema (generalmente más de una) de carácter global, o sea que abarcan todos sus aspectos significativos. La síntesis se produce antes de (se avanza a) la realidad física y la pauta de razonamiento es inductiva (de lo general a lo particular; propia de las tecnologías y del diseño [Roo, 1995]).

La *inducción* es el paso del ciclo básico de investigación experimental por medio del cual una diversidad de observaciones referidas a un determinado aspecto de la realidad (caída de los cuerpos, conducción del calor, fuerzas electromagnéticas) son agrupadas y resumidas en una ley general. La inducción presupone y va detrás de la realidad y, como su nombre indica, su pauta de razonamiento es inductiva.

Simulación frente a deducción

Partiendo de una construcción en el dominio mental (*diseño inicial*, en el ciclo básico de diseño; *hipótesis*, en el ciclo básico de investigación experimental) este paso realiza unas acciones distintas en los dos ciclos (*simulación y deducción*) con unos efectos que tampoco coinciden (*comportamiento y predicciones*).

En el ciclo básico de diseño, la *simulación* tiene por objeto establecer el *comportamiento* de los *diseños iniciales* mientras que, en el ciclo básico de investigación experimental, la *deducción* explora las *predicciones*, distintas de los hechos inicialmente observados a que conducen las *hipótesis* elaboradas en la etapa anterior. Dado que no suele disponerse de modelos adecuados de los *diseños iniciales*, antes de la *simulación* hay que crear prototipos virtuales o físicos. El *comportamiento* de los prototipos virtuales se obtiene por deducción (análoga a la de las predicciones en el ciclo básico de investigación experimental), a menudo con la ayuda de herramientas informáticas, mientras que el *comportamiento* de los prototipos físicos se obtiene por medio de ensayos análogos a las pruebas del ciclo básico de investigación experimental (sin embargo, en este último caso su objetivo es establecer el grado de *concordancia* entre las *predicciones* de las *hipótesis* y los *hechos* observados). Para determinados aspectos cualitativos, la *simulación* también puede basarse en juicios de valor de usuarios o de expertos.

Evaluación frente a pruebas

En el ciclo básico de diseño, este paso tiene por objeto comprobar el grado de concordancia entre el *comportamiento* obtenido por simulación o ensayo del diseño inicial y las *especificaciones* establecidas al inicio del ciclo. La actividad tiene lugar en el dominio mental y en el área de los juicios de valor.

Como se ha avanzado en el paso anterior, en el ciclo básico de investigación experimental, se realizan *pruebas* para comprobar el grado de concordancia entre *predicciones* basadas en las hipótesis y los *hechos* observados. La actividad tiene lugar en el dominio de la realidad material.

Decisión frente a validación

Este último paso de los ciclos básicos puede desembocar en distintas salidas en función de los resultados del paso anterior.

En el ciclo básico de diseño estas salidas son: *a)* La aceptación de una determinada solución después de ponderar diversas alternativas y escoger una de ellas; *b)* La retroacción (o nueva iteración) para mejorar una determinada solución o para generar nuevas alternativas; *c)* La suspensión o el abandono del proyecto.

En el ciclo de investigación experimental, si las pruebas muestran mejor concordancia entre las predicciones y los hechos experimentales que con las teorías e hipótesis anteriores, se valida la nueva teoría que pasa a aumentar el conocimiento; en caso contrario, se procede a una nueva iteración o se abandona la investigación.

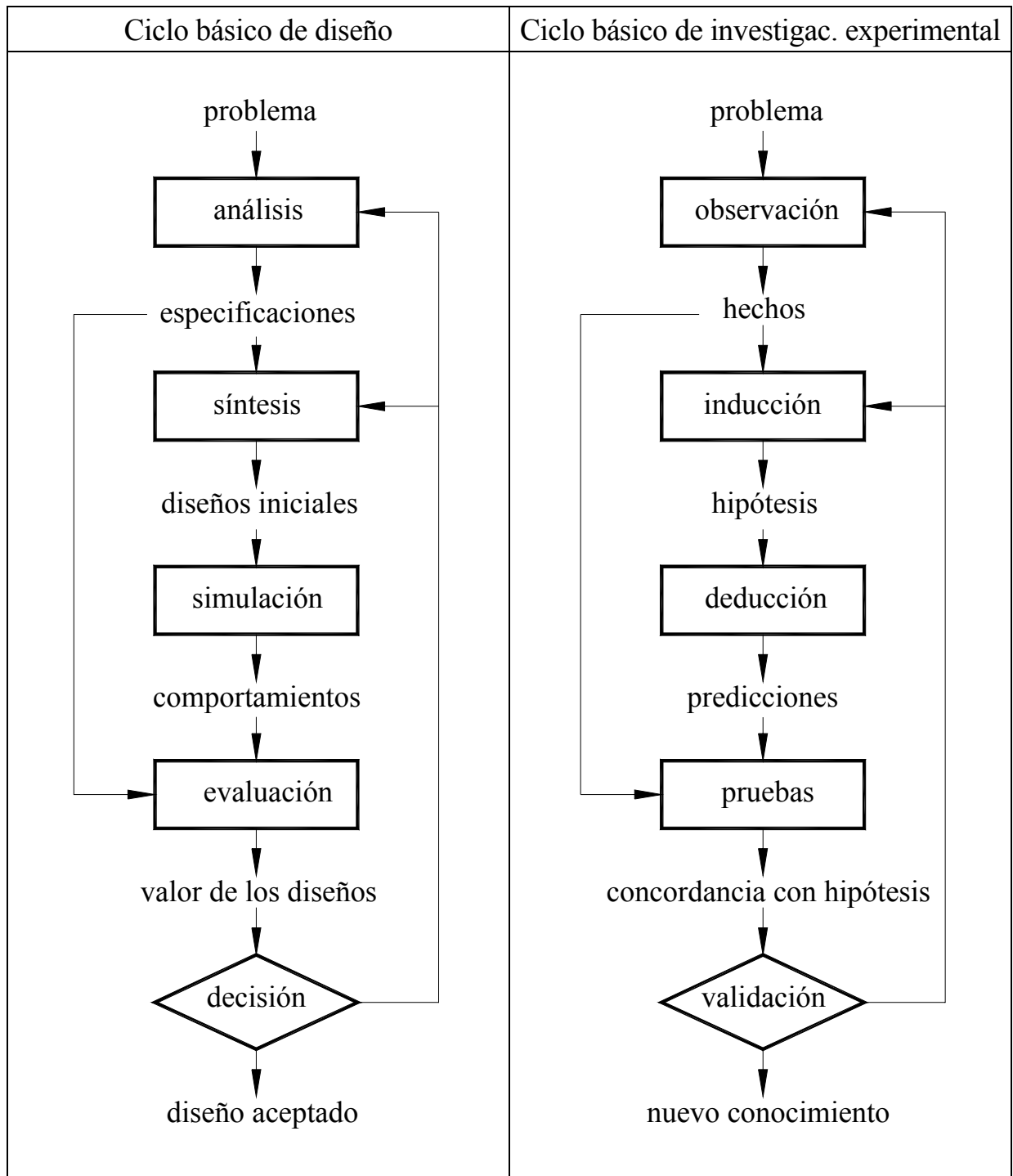


Figura 16.2 Ciclos básicos de los modelos de resolución de problemas

Ciclo básico de diseño	Ciclo básico de invest. experimental
<p><i>Carácter</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se propone transformar el mundo (estructuras reales) • La tecnología juega el papel principal y la ciencia un papel instrumental • El ciclo de diseño tiene lugar esencialmente en el dominio mental; ciertas simulaciones entran en el dominio material • En el ciclo de diseño se propone la construcción de posibles mundos aún no reales 	<p><i>Carácter</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se propone el conocimiento del mundo (estructuras mentales) • La ciencia juega el papel principal y la tecnología un papel instrumental • El ciclo de investigación experimental tiene lugar necesariamente en los dominios mental y material • El ciclo de invest. experimental se dirige a establecer imágenes del mundo real
<p><i>Problema práctico</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • La realidad no siempre está de acuerdo con nuestros valores y preferencias; por lo tanto, queremos transformar la realidad • El problema se sitúa en el área de los juicios de valor en el dominio mental 	<p><i>Problema teórico</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • La realidad no está de acuerdo con la teoría; luego, hay que ajustar la teoría • El problema se sitúa en el área de la exposición de hechos en el dominio mental
<p><i>Análisis</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Por medio de razonamiento • Por medio de valores 	<p><i>Observación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Por medio de observación y medidas • Tan objetivo como sea posible
<p><i>Síntesis</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pauta de razonamiento: inroducción • Orientado a la globalidad • A priori de la realidad considerada 	<p><i>Inducción</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pauta de razonamiento: inducción • Orientado a un solo aspecto • A posteriori de la realidad considerada
<p><i>Simulación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Comprende dos pasos: <i>a)</i> Crear el modelo de simulación; <i>b)</i> Obtener el comportamiento basado en el modelo • Puede basarse (o no) en experimentos con modelos físicos • El resultado es una predicción condicional • El resultado atañe al comportamiento o al proceso en su globalidad 	<p><i>Deducción</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se puede realizar inmediatamente después de los resultados de la fase de inducción • Tiene lugar en el dominio mental • El resultado es una predicción categórica • El resultado atañe a un solo aspecto
<p><i>Evaluación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Compara el diseño con las especificaciones • Dirigida hacia valores • Tiene lugar en el dominio mental 	<p><i>Pruebas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Compara la predicción con los hechos • Dirigida hacia la veracidad • Tiene lugar en el dominio de la realidad material
<p><i>Decisión</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Si es positiva, se pasa a la realización • El problema se sitúa en el área de los juicios de valor en el dominio mental 	<p><i>Evaluación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Si es positiva, se llega al final del proceso • El resultado aumenta el conocimiento en el dominio mental

2.3 Proceso de diseño y proceso de desarrollo

Introducción

El ciclo básico de diseño es una unidad fundamental que se aplica de forma iterativa a lo largo de todo el proceso de diseño en una secuencia en forma de espiral convergente donde cada vez las soluciones obtenidas se aproximan más a los objetivos y requerimientos del enunciado del problema.

Sin embargo, debido a su carácter general y abstracto, no ofrece el suficiente alcance para establecer una metodología de diseño, por lo que conviene estructurar el proceso de diseño en grupos de actividades relacionadas que conduzcan a ciertos estadios de desarrollo.

El modelo de etapas del proceso de diseño se basa en la idea que el diseño puede expresarse en cuatro niveles de definición que determinan los resultados de cada una de las etapas sucesivas:

<i>Etapa 1:</i> Definición del producto	<i>Resultados:</i> Especificación
<i>Etapa 2:</i> Diseño conceptual	<i>Resultados:</i> Principios de solución, estructura funcional, estructura modular
<i>Etapa 3:</i> Diseño de materialización	<i>Resultados:</i> Planos de conjunto
<i>Etapa 4:</i> Diseño de detalle	<i>Resultados:</i> Planos de pieza, documentos de fabricación

La Figura 2.3 reproduce el esquema de etapas del proceso de diseño dado por la norma alemana VDI 2221. En los apartados siguientes se realiza una breve descripción y caracterización de cada una de estas etapas para, más adelante (Secciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7), tratar con mayor amplitud cómo establecer la especificación y cómo generar el concepto, cómo materializar la solución y cómo documentar la fabricación.

Definición del producto

Esta es una etapa fundamental del proceso de diseño que parte del enunciado inicial del producto y establece aquellas acciones destinadas a definirlo de forma completa y precisa. En general, el enunciado inicial hace referencia a una idea o a determinados aspectos sobre el producto, pero no tiene el nivel de concreción suficiente para permitir iniciar los trabajos de diseño con garantías de acierto.

Este apartado tiene el objetivo de establecer un conjunto de determinaciones completa y suficiente que se organizan en forma de *documento de especificación* (ver Sección 2.5).

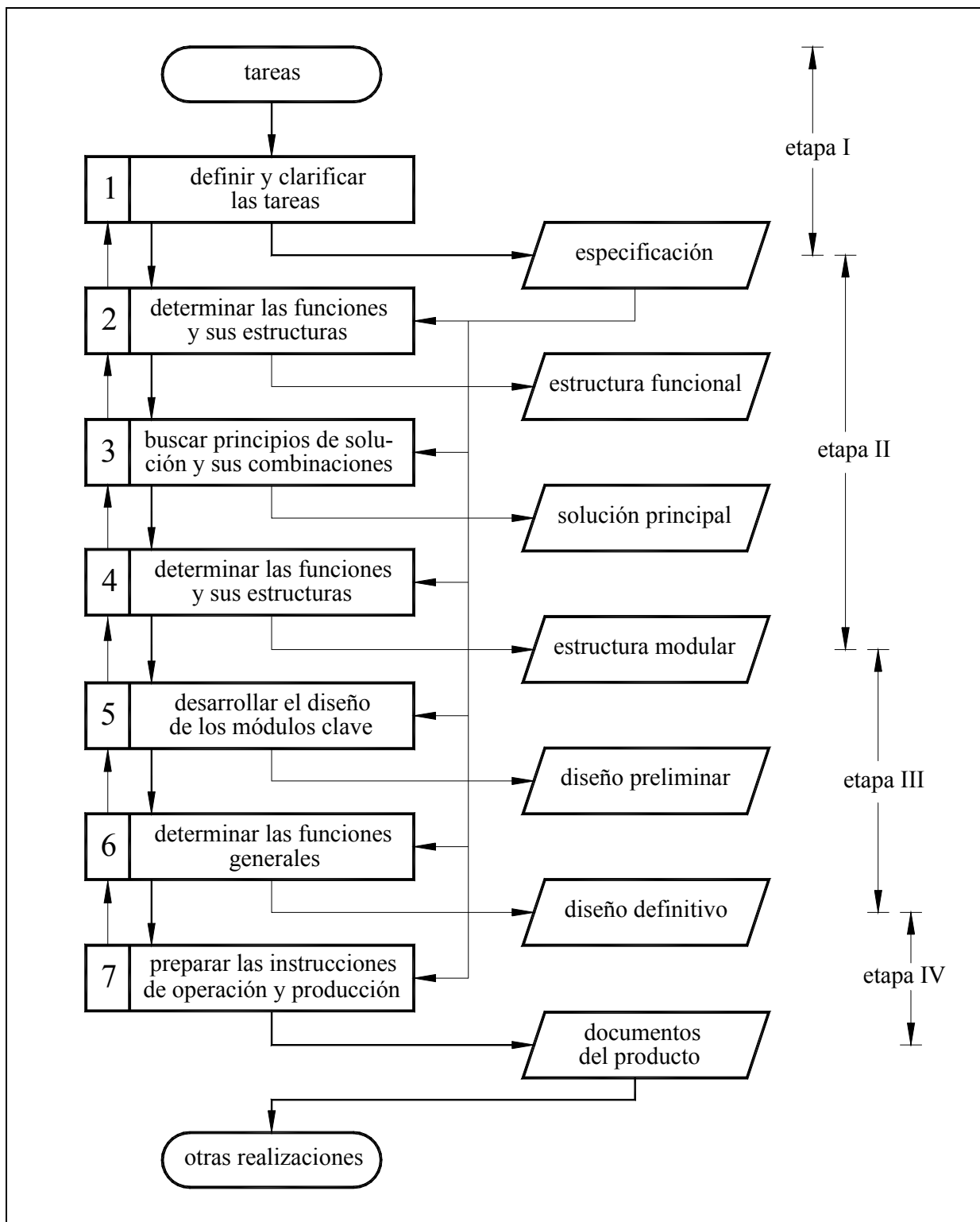


Figura 2.3 Etapas del proceso de diseño según la norma alemana VDI 2221. Presenta el interés, frente a otras propuestas [Pah, 1984], [Fre, 1985], de que aparece explícitamente una etapa de división del producto en módulos realizables.

El establecimiento de la especificación permite al equipo de diseño recorrer las posibilidades y límites del problema. En esta etapa fundamental para el desarrollo posterior del proyecto hay que informarse y documentarse sobre aspectos como:

- Modos de operación principales, ocasionales y accidentales del producto (funcionamiento habitual, transporte, reparación, incidencias y accidentes).
- Entorno donde opera (atmósfera húmeda, seca, corrosiva; incidencia o no de la luz solar; espacio interior y/o exterior; lugar para guardarlo)
- Servicios de entorno (dónde y cómo va a alimentarse; infraestructuras que requiere; cómo se mantiene y quién lo repara)
- Aspectos de fabricación (series de fabricación y período de producción; inversiones a qué está dispuesta la empresa; fabricación propia o subcontratación)
- Aspectos comerciales (precio de venta; apariencia del producto; variantes que deben ofrecerse; posibilidad de ampliaciones)
- Aspectos legales (política a seguir respecto a patentes; normas sobre los productos; directivas y reglamentos sobre seguridad y medio ambiente)
- Política general de la empresa (situación de los productos de la empresa en el mercado; grado de innovación de los productos)

Diseño conceptual

Esta etapa del proceso de diseño parte de la especificación del producto, origina diversas alternativas de principio de solución y, después de evaluarlas, elige la más conveniente. El resultado, dado como principio de solución evaluado y validado, no tiene una forma de presentación aceptada de forma general (en muchos casos, esta etapa se cumple cuando el responsable del proyecto o el grupo de diseño da el visto bueno a un determinado principio de solución; lamentablemente, no suele generarse más documentación que el acta de la reunión). El diseño conceptual está muy directamente relacionado con la especificación y, a menudo, se debe renegociar algún requerimiento ya que las soluciones resultan demasiado complejas, costosas, pesadas o voluminosas; en algunos casos aparecen nuevas posibilidades.

La etapa conceptual es en general la más innovadora y sus soluciones suelen llevar el germen de todo el desarrollo posterior. Por lo tanto, debe promoverse un ambiente propicio a la creatividad entre los miembros del equipo de diseño pero, al mismo tiempo, debe fomentarse un sentido crítico y riguroso en la evaluación de las soluciones (necesariamente poco definidas en esta etapa del diseño) ya que, cualquier omisión, olvido o error de concepto ocasiona más adelante dificultades importantes en el proyecto. Para fundamentar la evaluación suelen ser útiles ciertas simulaciones virtuales y determinados prototipos preliminares que permiten eliminar dudas y avanzar por caminos contrastados (ver Secciones 1.7 y 2.4).

En sistemas de elevada complejidad, a partir de la estructura funcional y de otras consideraciones, es interesante definir una estructura modular del producto como herramienta fundamental para gestionar los procesos de diseño y de desarrollo.

Las actividades de diseño conceptual son las que obtienen más beneficios de los equipos de diseño pluridisciplinarios y de las decisiones compartidas. El gestor del proyecto, además de participar en las tareas colectivas, tiene también la tarea de preparar las reuniones y de obtener o generar la información.

Diseño de materialización

Una vez elegido un principio de solución, debe materializarse el producto por medio de un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces, uniones y otros elementos que se harán realidad a través de los materiales, las formas, las dimensiones, los acabados superficiales y otras determinaciones. El resultado de esta etapa se da en forma de los planos de conjunto del producto o sistema que muestran como se articulan las diferentes partes para formar el conjunto montado, donde las piezas y elementos corresponden a la versión final materializada (o sea, con las formas y dimensiones reales).

El diseño de materialización también desarrolla soluciones alternativas sobre soluciones constructivas (soporte de chapa doblada o embutida; de acero o de aluminio; integra diferentes funciones o las reparte entre diversas piezas) para, después de evaluarlas, escoger una. Es bueno acompañar los planos de conjunto de una memoria anexa con los aspectos más relevantes de los trabajos (soluciones adoptadas y descartadas, con los motivos), hipótesis de partida, cálculos y simulaciones, así como referencias de los prototipos y ensayos realizados con los resultados. De no hacerse así, las modificaciones posteriores pueden significar rehacer parte del proyecto, aún más si las personas implicadas ya no trabajan en la empresa.

Los trabajos en esta etapa son los que más se acercan a las actividades tradicionales de los departamentos de diseño. En ellas, profesionales que dominan las nuevas técnicas de modelización y simulación (CAD/CAE) así como las de prototipaje y ensayo, desarrollan las piezas, elementos y conjuntos que compondrán el producto. Estas actividades son típicamente iterativas y se dirigen hacia la optimización (en función de los recursos humanos, materiales y de tiempo disponibles). En las fases de simulación y evaluación de las soluciones, conviene desarrollar prototipos funcionales y realizar ensayos de durabilidad (ver Secciones 1.7 y 2.6).

Diseño de detalle

Última etapa del proceso de diseño que, partiendo de la definición proporcionada por los planos de conjunto y la memoria anexa, tiene por objeto el despliegue de todos los documentos necesarios para la fabricación del producto. Los resultados del diseño de detalle son los planos de las piezas y conjuntos específicos, la documentación de los componentes de mercado incorporados y la relación de piezas y conjuntos (o módulos), todos ellos con su denominación, número de referencia, número de piezas, material y otras especificaciones técnicas (sobre acabados, procesos, ensayos de recepción) o de gestión (normas de aplicación, suministradores, contratistas).

Se puede argumentar que la realización de prototipos funcionales obliga ya al despliegue de planos de detalle en la etapa anterior. Pero, incluso en este caso, habrá que incorporar en el diseño definitivo los cambios y modificaciones derivados del ensayo.

El diseño de detalle no debe limitarse al despliegue del diseño de materialización, sino que tiene funciones propias como la comprobación de las funciones y la depuración de las soluciones para simplificar, eliminar o refundir elementos (diseño DFMA de última hora). A menudo, las buenas soluciones se originan en etapas anteriores, pero su articulación efectiva suele tener lugar durante el diseño de detalle.

Normalmente se producen muchas interacciones entre las etapas de diseño de materialización y de diseño de detalle, lo que no representa ningún problema añadido ya que las personas que suelen desarrollarlas son las mismas. Si bien es cierto que la partición del diseño en estas dos etapas es más de orden conceptual que práctico, hay que señalar que es improductivo realizar según que tareas de diseño de detalle antes de validar un producto con las pruebas de durabilidad.

Modelo de etapas del proceso de desarrollo

Este tipo de modelo (adoptado, entre otros, por Archer [Arc, 1971]) comprende tanto el diseño del producto como la planificación de las actividades de producción y comercialización concebidas como un todo y también establece las etapas y secuencias a realizar. El desarrollo global de un producto requiere la dedicación de importantes recursos humanos (diversos profesionales de elevada calificación laboral) y materiales (realización de estudios de mercado, de prototipos y ensayos, la adquisición de equipamiento y utillaje para la fabricación), y recursos para el lanzamiento comercial del producto.

En los límites del proceso de diseño, determinados aspectos como las demandas de los usuarios, o consideraciones financieras, comerciales y de fabricación aparecen tan solo como especificaciones externas que hay que cumplir (o negociar), mientras que en la perspectiva del proceso de desarrollo completo estos aspectos pasan a formar parte de las variables para la mejora global de la solución. Es recomendable proceder de forma concéntrica, o sea, haciendo avanzar simultáneamente las fases de desarrollo y de diseño, de manera que en cada nueva aproximación disminuya el riesgo de fallo.

Hay que tener presente que no todos los productos que se desarrollan tienen el éxito esperado en el mercado, por lo que el riesgo que se corre es elevado. Una buena planificación y ejecución del proceso de desarrollo, con la división en subproyectos y el establecimiento de etapas y procedimientos de validación, delimita en gran medida estos riesgos y aporta elementos para la toma de decisiones sobre medidas a adoptar en relación a las desviaciones en las prestaciones, los costes o los plazos e, incluso llegado el caso, sobre el abandono del proyecto.

Propuesta de proceso de desarrollo de un proyecto (según Archer)

<p>Planificación estratégica</p>	<p>1. Formular una política</p> <p>1.1 Establecer objetivos estratégicos</p> <p>1.2 Hacer un esbozo de calendario, presupuesto y líneas maestras para la innovación</p>
<p>Búsqueda (orientada al producto, mercado, materiales y a fabricación)</p>	<p>2. Búsqueda preliminar</p> <p>2.1 Seleccionar una invención, un descubrimiento, un principio científico, una idea de producto o una tecnología de base</p> <p>2.2 Identificar una necesidad, un mercado nuevo, un deseo de los usuarios, un producto defectuoso u otro valor</p> <p>2.3 Establecer el estado de la técnica (bibliográfico y en el mercado)</p> <p>2.4 Preparar un esbozo de especificación (especificación 1)</p> <p>2.5 Identificar posibles áreas con problemas críticos</p> <p>3. Estudio de viabilidad</p> <p>3.1 Establecer la viabilidad técnica (cálculos básicos)</p> <p>3.2 Establecer la viabilidad económica (análisis económico)</p> <p>3.3 Resolver los problemas críticos (invenciones)</p> <p>3.4 Esbozar una solución global (esquema de diseño 1)</p> <p>3.5 Estimar el trabajo de las fases 4 y 5 y la probabilidad de éxito (análisis del riesgo)</p>
<p>Diseño</p>	<p>4. Desarrollo del diseño</p> <p>4.1 Completar y cuantificar la especificación (especificac. 2)</p> <p>4.2 Desarrollar el diseño hasta el detalle (diseño 2)</p> <p>4.3 Predecir comportamiento técnico y el coste del producto</p> <p>4.4 Preparar la documentación del diseño</p> <p>4.5 Realizar experimentos de evaluación del diseño técnico y pruebas con usuarios</p> <p>5. Desarrollo de prototipos</p> <p>5.1 Construir maquetas y prototipos (prototipos 1)</p> <p>5.2 Realizar ensayos de laboratorio con prototipos</p> <p>5.3 Evaluar el comportamiento técnico</p> <p>5.4 Realizar pruebas de usuarios con prototipos (pruebas 1)</p> <p>5.5 Evaluar el comportamiento durante el uso</p> <p>6. Estudio de mercado</p> <p>6.1 Evaluar de nuevo el mercado a la luz de las pruebas</p> <p>6.2 Evaluar de nuevo los costes</p> <p>6.3 Evaluar la relación entre fabricación y comercialización</p> <p>6.4 Revisar los objetivos básicos (planificación estratégica) y el desarrollo del presupuesto</p> <p>6.5 Revisar la especificación (especificación 3)</p>

Desarrollo	7. Desarrollo de la producción 7.1 Desarrollar un diseño para la producción (diseño 3) 7.2 Preparar la documentación para la fabricación 7.3 Diseñar prueba técnicas, de usuario y de mercado 7.4 Construir prototipos de preproducción (prototipos 2) 7.5 Hacer pruebas técnicas, de usuario y de mercado (pruebas 2) 7.6 Evaluar el resultado de las pruebas y modificar el diseño
	8. Planificación de la producción 8.1 Preparar la planificación de la producción 8.2 Preparar la planificación de la comercialización 8.3 Diseñar el embalaje, el material de promoción y el manual de instrucciones 8.4 Diseñar las herramientas y los útiles
Inicio de la fabricación y comercialización	9. Fabricación de útiles y preparación de la producción 9.1 Construir las herramientas y útiles 9.2 Fabricar una preserie con los útiles (prototipos 3) 9.3 Hacer pruebas con los productos de preserie (pruebas 3) 9.4 Realizar los materiales de promoción y otros 9.5 Instalar los equipos de comercialización 9.6 Instalar los equipos de control de la producción
Producción	10. Producción y ventas 10.1 Iniciar el despliegue comercial 10.2 Iniciar la producción y las ventas 10.3 Recopilar la información del mercado, los usuarios, las reparaciones y el mantenimiento 10.4 Hacer recomendaciones para una segunda generación del producto (etapas de la 2 a la 4) 10.5 Hacer recomendaciones sobre investigaciones (etapas 1 y 2)

La simple lectura de esta propuesta de programa para el proceso de desarrollo de un proyecto pone de manifiesto, por un lado, la complejidad de la gestión de este proceso y el grado de involucración que exige al conjunto de la empresa y, por otro lado, el interés de que el diseño de los productos se articulen en un proceso de desarrollo que los sostiene y los arropa.

Aunque podría parecer lo contrario, el situar el diseño de un producto en el marco de su proyecto completo proporciona nuevas libertades para la concepción y el desarrollo ya que aspectos que de otra forma serían considerados como datos externos al propio proceso de diseño (las especificaciones, los medios de producción, las reacciones de los clientes) pasan ahora a un plano de igualdad, en cierta medida, como nuevas variables del diseño.

2.4 Establecer la especificación

Introducción

La decisión de desarrollar un producto parte de la *manifestación de una necesidad* o del *reconocimiento de una oportunidad* que puede tener numerosos orígenes comprendidos entre los dos casos extremos siguientes:

- a) La petición explícita de un cliente (producto por encargo, máquina especial)
- b) Un estudio de mercado del fabricante (nueva oferta, rediseño de un producto)

A partir de la manifestación de una necesidad o del reconocimiento de una oportunidad (ya sea por encargo o por consideraciones de mercado), hay que establecer la *definición del producto*, etapa fundamental para su desarrollo posterior.

Las deficiencias en la etapa inicial de *definición del producto* llevan a menudo al desenfoque de su solución, dedicando esfuerzos a aspectos secundarios a la vez que se desatienden aspectos fundamentales. No es raro que una mala *definición del producto* conduzca al fracaso global de un proyecto.

La *definición del producto* se establece a través de la *especificación* que constituye la guía y referencia para el su diseño y desarrollo. Uno de los métodos que han demostrado mayor eficacia en esta actividad es el *desarrollo de la función de calidad*, *QFD* (ver Sección 3.4).

No hay que sacralizar la especificación, ya que si es excesivamente ambiciosa o restrictiva puede repercutir en un incremento no justificado del coste del producto, en un aumento de la dificultad de fabricación o en la reducción de la robustez de su funcionamiento. En estos casos, es más razonable reconsiderar la especificación que no forzar su cumplimiento, estableciendo un proceso iterativo entre la definición del producto y su diseño conceptual: la especificación actúa como propuesta mientras que el diseño conceptual confirma o no su viabilidad.

Especificación del producto

La *especificación del producto* es la manifestación explícita del conjunto de determinaciones, características o prestaciones que debe guiar su diseño y desarrollo. Cabe distinguir entre dos tipos de especificaciones:

Requerimiento (R, o especificación necesaria)

Es toda especificación sin la cual la máquina pierde su objetivo.

Deseo (D, o especificación conveniente)

Es toda especificación que, sin ser estrictamente necesaria para el objetivo de la máquina, mejoraría determinados aspectos de ella.

Lista de referencia de especificaciones (*checklist*)

La *especificación* para la *definición del producto* puede ser muy larga y minuciosa o muy corta, según la conveniencia en cada caso. Es conveniente que la especificación establezca los requerimientos y deseos pero que evite la descripción de formas constructivas que constituyen tan solo una de sus posibles soluciones.

Ejemplo 16.1 (ver más adelante). Si en la especificación de una pequeña grapadora manual se establecen una dimensiones máximas de la base, se obliga a una determinada solución constructiva con base, cuando esta puede ser una de las libertades de diseño.

Al establecer la especificación para la *definición del producto* conviene disponer de una *lista de referencia de especificaciones* que permita recorrer de forma metódica distintos conceptos relacionados con las funciones, características, prestaciones y condiciones del entorno del producto. Corresponde a las personas implicadas en el diseño del producto fijar si una determinada especificación es un *requerimiento* o un *deseo*.

Modelo de documento de especificación

Como referencia inicial del proceso de diseño conviene organizar las *especificaciones* de un proyecto en un documento breve denominado *documento de especificación* (o, simplemente, *especificación*) con el máximo de información útil. A continuación se presenta un modelo que, además de un encabezado con la empresa fabricante (eventualmente, la empresa cliente), la denominación del producto y las fechas de inicio y última revisión, contiene las siguientes determinaciones:

- Concepto:* Facilita la agrupación de las *especificaciones* (funciones, movimientos, fuerzas) de manera que sean fácilmente localizables.
- Fecha:* Determina la fecha (o reunión) en la que se acordó una *especificación*. Conviene ordenarlas por fechas cada vez más recientes.
- Propone:* Mantiene constancia, por medio de signos, de quien propuso cada una de las *especificaciones* (el cliente, un departamento de la empresa fabricante). Si hay que reconsiderar una especificación o recabar información adicional sobre una de ellas, conviene localizar rápidamente con quién hay que tratar el tema.
- Tipo:* Indica si una *especificación* es un requerimiento (*R*) o un *deseo* (*D*); también indica si se trata de una *modificación de requerimiento* o de *deseo* (*MR*, *MD*), o de un *nuevo requerimiento* o *deseo* (*NR*, *ND*).
- Descripción:* Explicación breve y concisa de la *especificación* desde el punto de vista de los requerimientos y deseos del usuario del producto. Hay que evitar las descripciones que incluyan soluciones concretas.

Lista de referencia de especificaciones	
Conceptos	Determinaciones
Función	Descripción de las funciones principales, ocasionales y accidentales del producto (si es necesario, con esquemas)
Dimensiones	Espacios, volúmenes, masas, longitudes, anchuras, alturas, diámetros; número y disposición de elementos
Movimientos	Tipos de movimiento; desplazamientos, secuencias y tiempos; trayectorias, velocidades y aceleraciones
Fuerzas	Magnitud, dirección y sentido de fuerzas y momentos; variación en el tiempo; desequilibrios y deformaciones admisibles
Energía	Accionamientos mecánico y otros conversores de energía: alimentación y control; transmisiones; potencia y rendimiento
Materiales	Flujo, transporte y transformación de materiales; limitaciones o preferencias sobre su uso; condicionantes de mercado
Señales y control	Señales de entrada y salida; sensores y actuadores; funciones del sistema de control
Fabricación y montaje	Volumen previsto de producción y cadencia en el tiempo; limitaciones o preferencias en procesos y equipamiento; variantes en el producto y flexibilidad en la fabricación
Transporte y distribución	Embalaje y transporte: dimensiones, masas, orientación, golpes; instalación, montaje y puesta a punto
Vida útil y mantenim.	Vida prevista; fiabilidad y mantenibilidad; tipo de mantenimiento e intervalos de servicio; criterios sobre recambios
Costes y plazos	Costes de desarrollo y preparación de utillaje; plazos de desarrollo y tiempo para el mercado
Seguridad y ergonomía	Sistemas y dispositivos de seguridad; relación con el usuario: operación, inteligibilidad, confort y aspecto
Impacto ambiental	Consumos de energía y materiales; limitaciones al impacto ambiental en la fabricación, utilización y fin de vida
Aspectos legales	Cumplimiento de normativas (función de los usos y mercados); evitar la colisión con patentes

Modelo de documento de especificación

Empresa:		Producto:		Fecha inicial: última revisión:
				Página 1/n
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	fecha-1	C M	R D	Descripción de la función-1 Descripción de la función-2
	fecha-2	D+C	MR	Modificación de la función-1
Etc.	Etc.	Etc.	Etc.	Etc.

Propone: C = Cliente; M = Marketing; D = diseño; F = Fabricación

R/D: R = Requerimiento; MR = Modificación de requerimiento; NR = Nuevo requerimiento;
D = Deseo; MD = Modificación de deseo; ND = Nuevo deseo

*Ejemplo 2.1****Especificación para el diseño de una pequeña grapadora manual (proyecto G15)***

Después de un estudio de mercado, la empresa SCRIPT S.A., se dispone a desarrollar una pequeña grapadora manual y recorre a los departamentos de marketing, diseño i fabricación para establecer la *especificación*. Dado que incide en un mercado muy competitivo, se propone incluir en la especificación un dispositivo para desgrapar, función que proporcionaría valor añadido al producto.

Empresa: SCRIPT S.A		Producto: Grapadora G15		Fecha inicial: 15/2/2001 última revisión: 1/7/2001
				Página 1/1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	15/2/01	M	R	Grapar mínimo de 15 hojas (grapa 23/6)
		M	R	Almacén mínimo de 80 grapas, recargable
	1/7/01	D	D	Incorporar un dispositivo para desgrapar
Dimensiones	15/2/01	M+D	R	Dimens.: 80x30x20 mm; Peso máximo: 60 g
Fabricación	15/2/01	M	R	200.000 unidades/año
	15/2/01	D+F	R	Inversión máxima en utillajes: 120.000 €
Costes	15/2/01	M	R	Coste máximo de fabricación: 1,90 €
	5/6/01	M+P	MR	Coste máximo de fabricación: 1,75 €

Propone: M = Marketing; D = diseño; P = Producción; F = Financiación

R/D: R = Requerimiento; MR = Modific. requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo

*Ejemplo 2.2***Especificación para un sistema de clasificación de cajas (Proyecto SCC-2000)**

La empresa fabricante de cosméticos, **COSMET S.A.**, quiere automatizar el sistema de clasificación y expedición de cajas. A tal efecto, encarga a la empresa **Enginyers Associats S.A.** que desarrollen y dirijan el proyecto. Se elabora el siguiente documento de especificación (última fecha 8/6/2001):

Empresa cliente: COSMET S.A		Producto: Sistema de clasificación		Fecha inicial: 11/4/2001 última revisión: 8/6/2001
Empresa de ingeniería: Enginyers Associats S.A		de cajas (proyecto SCC-2000)		Página 1/3
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	11/4/01	C	R	Sistema para transportar y clasificar cajas
		C	R	Clasificar 4 tipos de caja en 4 líneas
		C+I	R	Reconocer y contabilizar las cajas
		C+I	R	Almacenar hasta 20 cajas por línea
		C+I	D	Almacenar hasta 30 cajas por línea
		C	M	Clasificar 20 cajas por minuto
Dimension.	11/4/01	C	R	Cajas de 300x250x200 a 380x320x300 mm
		C	R	Pesos de las cajas entre 17 y 30 N
Movimient.	11/4/01	C	R	Local disponible de: 12x15 m
		C	MR	Cajas de 280x250x230 a 400x320x300 mm
Fuerzas	11/4/01	C	R	Empuje máximo acumulación: 120 N
Materiales	11/4/01	C	R	Cajas de cartón selladas con cinta adhesiva
		C	R	Pupitre de control a la entrada del sistema
Señales y control	11/4/01	C	R	Posibilidad de introducir correcciones a mano
		C+I	NR	Detección por código de barras
Transporte	11/4/01	C	R	Acceso local: anchura/altura: 1200x2400 mm
Vida útil	11/4/01	C+I	D	En operación: 10 años; Fiabilidad: 99 %
Costes y plazos	11/4/01	C+I	R	Presup.: 0,2 M€ (contrato); Plazo: 5 meses
	8/6/01	C+I	MR	Presupuesto: 0,22 M€ (modific. contrato)
Asp. legales	11/4/01	C	R	Cumplimiento norma europea seguridad

Propone: C = Cliente; I = Ingeniería

R/D: R = Requerimiento; MR = Modific. requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo

Caso 2.1

Renegociación de una especificación para un movimiento rápido

Se da la siguiente especificación inicial para el cabezal de una máquina que realiza un movimiento de vaivén con desplazamientos rápidos:

- 1) Ciclo de 5 movimientos de avance y 5 de retroceso alternativos con tiempos de parada entre movimientos de 1 segundo y desplazamientos de 15 mm
- 2) Tiempo máximo de ciclo de 10,5 segundos
- 3) Velocidad del cabezal de 2 m/s.

Dado que el ciclo tiene 9 paradas (9 segundos), el tiempo máximo para cada uno de los 10 desplazamientos de 0,015 metros es de $(10,5-9)/10=0,15$ segundos. Suponiendo un diagrama de velocidades triangular, se requiere una aceleración de $2,67 \text{ m/s}^2$, y debe alcanzarse una velocidad de 0,20 m/s. Hay que reconsiderar el requerimiento de velocidad de 2 m/s que impone un accionamiento sobredimensionado sin aportar ninguna prestación adicional.

Especificación derivada

Cada día son más frecuentes los proyectos en los que se diseña un sistema por combinación de componentes o máquinas (*módulos* del sistema; ver Sección 17.1) que ofrece el mercado (per lo que no son susceptibles de modificación) que deben estructurarse para que respondan de forma óptima a la especificación inicial del problema.

Dada la tendencia del mercado a proporcionar una oferta cada día más diversificada y consistente de componentes y máquinas, el problema de diseño descrito anteriormente será cada día más frecuente, especialmente en el desarrollo de sistemas únicos (líneas de manipulación específicas, máquinas de proceso, instalaciones).

La tesis de Maury [Mau, 2000] hace una aportación conceptual i metodológica importante para la resolución de este tipo de problemas de diseño al incorporar un paso preliminar entre la *especificación (inicial)* y el establecimiento de la *estructura funcional* (ver Sección 17.1) que llama *especificación derivada* y que ejemplifica en el diseño de sistemas continuos de manipulación i procesamiento primario de materiales a granel, pero que puede extrapolarse a otros sistemas análogos.

La especificación derivada transforma el problema desde el nivel de los requerimientos al nivel de las funciones y es una herramienta de gran importancia cuando se diseña desde una perspectiva sistemática. Los conceptos de cadena y de ramal de flujo y la caracterización de las funciones básicas y las funciones globales permiten la subdivisión del problema en elementos más simples y facilitan la construcción de la estructura funcional.

Una vez se dispone de la estructura funcional se puede iniciar la síntesis de soluciones en la que se pasa del nivel de funciones al nivel de las alternativas que, gracias a criterios limitadores i a una estrategia de acotación heurística del campo de soluciones, permite descartar más del 99% de las soluciones generadas.

2.5 Generar el concepto

El diseño conceptual parte de la especificación y proporciona como resultado un *principio de solución* aceptado. Sin embargo, también ofrece resultados a otros dos niveles que tienen su interés y aplicaciones: la *estructura funcional* y la *estructura modular* (ver Sección 3.1).

En todas las etapas de diseño (*conceptual, de materialización, de detalle*) se sigue un proceso de generación de soluciones alternativas que después son simuladas o probadas y evaluadas lo que constituye la base para la decisión de seguir con una de ellas. Sin embargo, el diseño conceptual es la etapa en la que este proceso tiene una mayor relevancia y significado. Es por ello que esta sección se ha titulado *generar el concepto*.

Herramientas para el diseño conceptual

La herramienta más importante del diseño conceptual es el establecimiento de la *estructura funcional*.

Como se verá más adelante (Sección 3.1) se organiza en un diagrama de bloques que representan las funciones que debe realizar el producto (independientemente de las soluciones que se adopten) y donde los enlaces representan los flujos de *energía, materiales y señales* entre las entradas, las salidas y las funciones.

La estructura funcional puede representarse o bien a nivel de la *función global* del producto o sistema, o bien, dependiendo de su complejidad, puede subdividirse en partes que contienen *subfunciones* de menor complejidad. La subdivisión en subfunciones presenta una gran importancia en el proceso de diseño conceptual y se orienta a tres objetivos:

- a) Proporcionar una estructura funcional más detallada y comprensible, a la vez que menos ambigua
- b) Facilitar la búsqueda de principios de solución para las subfunciones que, por combinación, deben dar principios de solución para la función global.
- c) Facilitar la creación de la estructura modular del producto

En un *diseño original* a priori no se conoce la estructura funcional, y su definición forma parte del proceso de diseño. En un *diseño de adaptación*, inicialmente se conoce la estructura funcional pero ésta puede ser variada o modificada en el curso del proceso de diseño. Finalmente, en el *diseño de variante* se conoce la estructura funcional y ésta no varía.

Proceso creativo

El *proceso creativo* es aquél donde se elaboran las soluciones a un problema distintas de las existentes y los *métodos de creatividad* son aquellos cuyo objetivo es ayudar y estimular este proceso.

La creatividad se basa en tres componentes: los *conocimientos y habilidades* en el campo donde se trabaja; la *motivación* por el problema que debe resolverse; y la *experiencia e intuición* en relación al problema y sus circunstancias.

Desde el punto de vista metodológico el proceso creativo suele seguir los siguientes pasos:

- *Imponerse al problema*

En primer lugar, el creador debe conocer bien el enunciado y las delimitaciones del problema. De no hacerse así, surgen falsos principios de solución que después son descartados en la fase de evaluación. Muy a menudo el establecimiento de la *especificación* suele cubrir este primer paso (ver Sección 2.4). Sin embargo, la herramienta por excelencia para esta tarea es el *análisis funcional*.

- *Generar ideas*

Este es el proceso central de la creatividad donde surgen ideas nuevas y se crean alternativas de principios de solución.

Se puede proceder de dos maneras: intentando hallar un principio de solución válido para la *función global* del sistema; o bien, intentar hallar soluciones parciales a *subfunciones* de la estructura funcional y después proceder a la solución global por combinación de ellas.

Cabe decir que cualquier combinación de soluciones parciales a subfunciones no constituye necesariamente una solución a la función global. Queda, pues, la tarea de descartar las soluciones no válidas.

Muy a menudo, las soluciones parciales descartadas pueden adquirir más adelante un nuevo interés a la luz de otras soluciones globales o parciales, por lo cual no es recomendable descartar ninguna solución, por poco útil que parezca, hasta que se adopta una solución global.

- *Simular y evaluar soluciones*

Estos dos pasos del ciclo básico de diseño, sin formar parte directamente del núcleo de la creatividad, sin embargo constituyen elementos complementarios de singular importancia. En efecto, son los que apoyan la validación de los principios de solución y, aún en el caso de no validarlos, aportan información sobre qué aspectos no se han cubierto y sus causas. Dado que difícilmente la generación de un concepto válido se consigue a la primera vuelta, la simulación y evaluación constituyen elementos imprescindibles para iniciar la segunda vuelta con mayores garantías de éxito.

Generación de principios de solución

A diferencia de otras actividades, es difícil asegurar resultados en el proceso creativo, y buena prueba de ello es que puede transcurrir mucho tiempo sin que se produzcan avances significativos y, luego, en un momento, aparecer una idea feliz o desencadenarse la generación de varios principios de solución. Sin embargo, el proceso creativo tampoco es una actividad espontánea sino que necesita una preparación y una ejercitación. Así pues, a lo largo del tiempo se han establecido numerosos métodos para fomentar y estimular la creatividad, algunos de los cuales se describen y valoran a continuación.

Métodos convencionales

Búsqueda en fuentes de información

En la literatura técnica existen textos dedicados a la exposición de principios de solución o a la exposición de casos. En ellos el diseñador puede hallar una fuente de inspiración para aplicarlos al caso presente.

Analogías con sistemas naturales

El estudio de las formas naturales, las organizaciones de comunidades animales o vegetales o los comportamientos pueden proporcionar, por analogía, importantes elementos de referencia para los problemas técnicos.

Analogías con otros sistemas técnicos

Los principios de solución aplicados con éxito en un determinado campo de la técnica, pueden ser transpuestos a situaciones análogas en otra aplicación siempre que se adapte a los nuevos requerimientos.

Análisis de la competencia

El análisis de los productos de la competencia proporciona una referencia de las posibilidades y los límites de la técnica (o, *estado de la técnica*) en un sector de actividad concreto; sin embargo, para incidir en el mercado hay que ir más allá.

Métodos intuitivos

Brainstorming (o tempestad de ideas)

Método sugerido en 1953 por Osborn para generar ideas a partir de crear las condiciones de apertura de la mente y ambiente distendido a un grupo no jerárquico, con miembros de procedencias tan distintas como sea posible, que, independientemente de su aplicabilidad inmediata, aporten con toda libertad ideas en relación al proyecto que, a su vez, desencadenen nuevas ideas en el resto de participantes. El conductor de la reunión debe registrar las ideas surgidas.

Este método puede ser especialmente útil cuando no se dispone de ningún principio de solución, o aquellos de los que se dispone, no satisfacen.

Sinéctica

Método sugerido en 1955 por Gordon, basado en un grupo y que recorre dos etapas. La primera (*hacer lo extraño familiar*), consiste fundamentalmente en el análisis del problema y sus delimitaciones. La segunda (*hacer lo familiar extraño*), consiste en trasponer el problema a otras situaciones a través de analogías: *personal*, en la que el participante intenta ponerse en el lugar o situación del problema; *directa*, donde intenta buscar una situación análoga en otro campo de aplicación; *simbólica*, donde intenta describir el problema simbólicamente, por ejemplo, a través de un proverbio; y *fantástica*, donde intenta describir una solución ideal.

Es parecido al brainstorming pero dispone de un hilo conductor a través de las analogías.

Método Delphi

Se pide a una serie de expertos su opinión acerca de un tema. La encuesta se organiza en varias fases: en la primera, se pregunta individualmente a cada experto qué puntos pueden resolver el problema; en las fases siguientes (de 1 a 3) se pregunta nuevamente a los expertos su opinión sobre las respuestas más frecuentes de la fase anterior, con lo que las respuestas de las sucesivas fases tienden a converger.

Este método se suele reservar para los temas de política de empresa o para criterios sobre desarrollos a largo plazo.

Métodos discursivos

Estudio sistemático de procesos físicos

Consiste en la modelización y exploración de comportamientos que pueden ser deducidos de leyes físicas o de modelos técnicos aceptados. Este es uno de los sistemas más frecuentemente utilizados y, generalmente, proporcionan resultados rápidos y satisfactorios. (ver Caso 1.4 en el Capítulo 1).

Esquemas de clasificación

Consiste en desarrollar sistemáticamente principios de solución y ordenarlos por medio de una tabla generalmente de dos entradas, una de ellas determinada por un parámetro significativo (por ejemplo, el sistema de energía utilizado) y, la otra, con las distintas soluciones obtenidas.

El método estimula la búsqueda de soluciones y facilita la identificación de características y la combinación de soluciones parciales para obtener la solución global.

Generación de variantes por inversión

Es un ejercicio de gran utilidad para el diseñador que consiste en generar nuevas variantes por inversión, cambio o transposición de funciones a un principio de solución ya conocido. Por ejemplo, las cerraduras suelen incorporarse a las puertas, pero nada impide que se incorporen en los marcos (nuevo principio de solución). De hecho, las puertas con apertura remota adoptan este principio de solución ya que tiene la ventaja de que los cables eléctricos están en la parte fija.

Caso 2.2

Especificación, concepto y ensayos preliminares en el desarrollo de una máquina universal de clasificar monedas

Proyecto desarrollado en colaboración entre la empresa Ibersélex S.A. de Barcelona y el Centre de Disseny d'Equips Industrials de la UPC (CDEI-UPC).

Especificación

El encargo consistía en diseñar un sistema mecánico de recogida y transporte de monedas con movimiento positivo (cada moneda se mueve en un eslabón de una cadena), destinado a una máquina universal de clasificar monedas.

Sobre esta idea no se conocían precedentes (las máquinas existentes funcionan por medio de dispositivos mecánicos limitados por las formas y dimensiones de las monedas). Se trataba, pues, de un *diseño original* que requería una importante etapa de diseño conceptual.

Inicialmente, pareció que la condición impuesta de desplazamiento positivo era una limitación innecesaria para las libertades de diseño; sin embargo, realizadas varias comprobaciones, se corroboró el acierto de esta especificación.

Fracaso del primer concepto

Se estableció un primer principio de solución en base a una cadena especial que resultó ser un fracaso. En una situación en que se planteaba el abandono del proyecto, una sugerencia desencadenó el desarrollo de una nueva solución.

Analogía y nuevo concepto

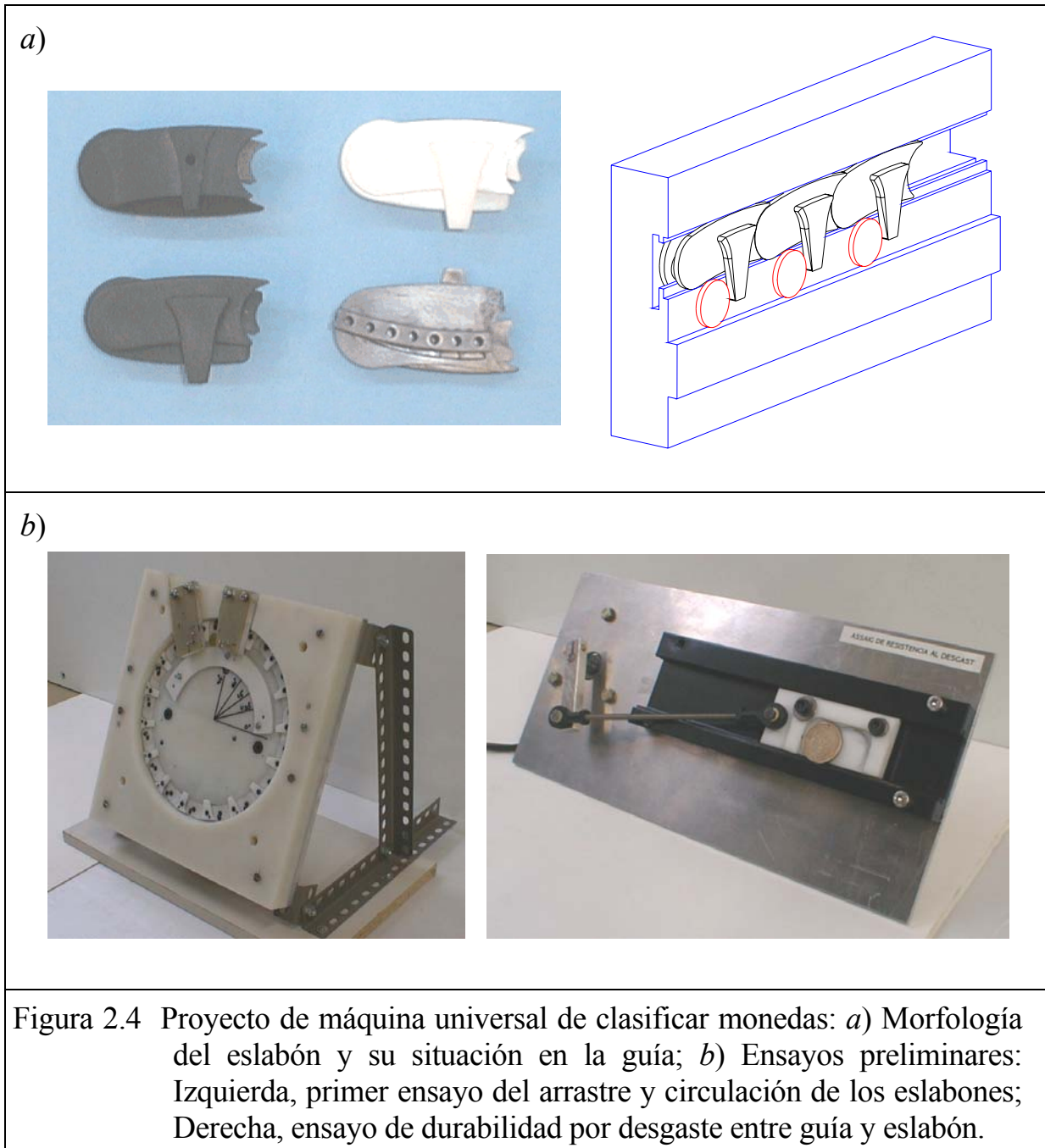
Esta persona afirmó: la cadena de transporte de las monedas *debe ser como las piezas de las guías de las cortinas*. Ello llevó a explorar una nueva solución en base a un tipo de cadena sobre una guía cerrada en la que los eslabones se empujaran unos a otros. A diferencia de la guía de la cortina que es recta, en esta aplicación había que dar solución a un sistema de guiado con dos tramos rectos, dos curvaturas distintas en un sentido y una curvatura de sentido contrario, además de ajustar geoméricamente el eslabón y la guía en la zona de recogida de la moneda, todo ello compatible con un sistema de arrastre motorizado. La resolución de este sistema (guía, eslabones, arrastre) llevó varios meses de trabajo y varias aproximaciones sucesivas (ver el eslabón en la Figura 2.4a).

Prototipos preliminares

Uno de los escollos más importantes de este diseño conceptual fue la elección de materiales: por un lado, los eslabones debían deslizarse perfectamente en las guías, pero a su vez la pestaña posterior de los eslabones debía ofrecer un buen agarre para las ruedas de arrastre. Se pensó en recubrir las guías de aluminio (necesidad de estabilidad dimensional) con una resina de poliamida y realizar los eslabones con poliacetal (combinación conocida y probada). El tema del arrastre se resolvió por el sistema de prueba-error hasta que se comprobó que ruedas recubiertas de

poliuretano ofrecían una solución. Existían dudas sobre si esta combinación de materiales proporcionaría el resultado deseado. Se realizaron varios prototipos simplificados y se sometieron a pruebas de comportamiento y de desgaste, lo que ocupó varios meses y obligó a hacer hasta 6 iteraciones para el ajuste de las características de los materiales (ver Figura 2.4b).

Finalmente el resultado fue positivo, el diseño fue patentado y se procedió al desarrollo del resto del proyecto.



2.6 Materializar la solución

Consideraciones generales

El *diseño de materialización* es la etapa del proceso de diseño en la cual, partiendo de un concepto, y por medio de conocimientos y criterios técnicos y económicos, se determinan las formas y dimensiones de las diferentes piezas y componentes y, a la vez, se articulan de manera que aseguren la realización de las funciones. El método usado sigue el ciclo básico de diseño (normalmente en varias iteraciones) y el resultado se da por medio de uno o más planos de conjunto (en inglés, *layout*).

La materialización del concepto incluye algunas de las actividades más tradicionales de la ingeniería de diseño: esbozar la disposición general; simular su comportamiento; calcular y dimensionar elementos (piezas, componentes, enlaces); ensayar y validar soluciones. Las nuevas herramientas asistidas por ordenador permiten avanzar en la optimización de las soluciones.

Sin embargo, a la luz de las nuevas concepciones de diseño que ponen el énfasis en el ciclo de vida de los productos (más allá de la función) y en su enmarque en un proceso de desarrollo más amplio (oportunidad del lanzamiento del producto, financiamiento del proyecto y planificación de la fabricación y comercialización), estas tareas más tradicionales también quedan afectadas.

A continuación se desarrollan los tres aspectos siguientes del diseño de materialización: *a)* Pasos del diseño de materialización; *b)* Generación de variantes por inversión; *c)* Establecimiento de un protocolo de ensayo.

Pasos del diseño de materialización

Aunque no es fácil dar recomendaciones sobre este tema, a continuación se establecen unos pasos que, inspirados en la propuesta de Pahl y Beitz [Pahl, 1984], permiten conducir la etapa de diseño de materialización (esquema de la Figura 2.5):

1. *Identificar los requerimientos limitadores*

Identificar aquellos requerimientos (o deseos) de la especificación que dan lugar a limitaciones en el diseño de materialización: *a)* Prestaciones exigidas (velocidades, fuerzas, tiempos, cadencias); *b)* Dimensiones exteriores, espacios disponibles, masas admisibles; *c)* Exigencias ergonómicas (fatiga, visión, seguridad, comprensión del control); *d)* Incidencias ambientales (evitar ruidos, contaminaciones y otros impactos; prever la corrosión); *e)* Tecnologías disponibles y capacidades de producción; *f)* Requerimientos de mantenimiento; *g)* Limitaciones de coste.

Muchas veces, la limitación de las dimensiones o de la masa constituye una de las especificaciones más importantes que puede comportar en sí mismo una gran ventaja competitiva. Por tanto, se vuelven importantes criterios de diseño.

Ejemplos: La dirección de las empresas suele imponer ciertas limitaciones dimensionales, constructivas, de materiales o de procesos de fabricación en el inicio de determinados proyectos, como por ejemplo: *a)* Airtècnics S.L. pidió diseñar un actuador de válvula (Figura 1.7) que, con las mismas dimensiones, ejerciera un par doble de los existentes en aquel momento en el mercado; *b)* Girbau S.A. estableció el requerimiento de que el túnel de lavado (Figura 3.2) fuese de construcción modular (facilita la fabricación y la comercialización); también pidió limitar sus dimensiones para que cupiera en un contenedor convencional (ahorro importante en los costes de transporte); *c)* Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya S.A., en el módulo de andén de geometría variable (Figura 1.6), impuso el requerimiento de que el sistema de accionamiento ofreciera seguridad intrínseca contra un posible despliegue fortuito (peligro de accidente por interferencia con el tren).

2. *Determinar las funciones y los parámetros críticos*

Un primer esbozo del diseño de materialización pone de manifiesto la existencia de determinadas funciones (provinendo directamente de la especificación del producto o de las funciones técnicas incluidas en la solución conceptual aceptada) y determinados parámetros (cuantitativos o cualitativos, generalmente relacionados con las funciones anteriores) que son críticos en la resolución del problema y sobre los que habría que establecer compromisos de diseño (*condiciones cuantitativas y cualitativas*).

Dado que estas funciones y parámetros críticos suelen tener importantes interrelaciones, hay que considerarlos conjuntamente para obtener una solución global (los requerimientos limitadores actúan, en general, como criterios de evaluación).

En los primeros pasos del despliegue del diseño de materialización se debe centrar la atención en las funciones y parámetros críticos para más adelante, proceder al estudio y resolución del resto de funciones y parámetros de los que se sabe que tienen una solución no comprometida (ver Ejemplo 2.3).

Ejemplo: La materialización de la máquina universal de clasificar monedas impulsada por Ibersélex S.A. (Figuras 1.8 i 2.4a), partió de un concepto basado en una cadena de eslabones, que se empujan unos con otros en el seno de una guía con varios tramos rectos y curvos, con cinco perfiles en planos diferentes (el superior que mueve las monedas; los tres intermedios que guían el eslabón en los diferentes tramos de la guía; y el posterior por donde se arrastra la cadena).

El diseño de materialización preliminar tuvo en cuenta diversas funciones críticas (recepción de las monedas; movimiento positivo de las monedas; guiado de los eslabones; detección de las monedas; expulsión de las monedas) y diversos parámetros críticos (diámetros máximo y mínimo de las monedas; longitud del eslabón, curvatura de los diferentes tramos de guía; tiempos de detección y de expulsión de las monedas), y utilizó como criterios de evaluación diversas especificaciones limitadoras (cadencia de clasificación, dimensiones máximas, peso, capacidad de los cajones de clasificación).

Condiciones críticas (cuantitativas y cualitativas)

Las funciones críticas, junto con los requerimientos limitadores de la especificación, se traducen en condiciones críticas (tanto cuantitativas como cualitativas) entre los parámetros críticos en base a los que se establecen los compromisos de diseño y se elaboran las diferentes soluciones alternativas.

3. Desplegar alternativas de diseño de materialización preliminar

Una vez identificados los *requerimientos limitadores* y determinadas las *funciones críticas* y los *parámetros críticos*, corresponde desplegar una o más soluciones de diseño de materialización preliminar.

Es decir, determinar por medio de cálculo o de otras consideraciones técnicas y económicas, las principales disposiciones, formas y dimensiones y una primera elección de los materiales de las piezas y componentes que intervienen en las funciones críticas. El resultado debe responder de forma global a las funciones principales del producto y cumplir los requerimientos limitadores. En este paso se debe decidir, seleccionar y situar (aunque sea de forma esquemática) los componentes de mercado que se incorporan al producto.

Hay diversas metodologías que ayudan a generar alternativas en el diseño de materialización entre las que, más adelante, se trata brevemente el método de la *inversión de funciones* o de la *inversión de características*.

En los productos en los que se ha establecido una estructura modular, se suele elaborar un diseño de materialización preliminar para cada uno de los módulos.

4. Evaluar las anteriores alternativas y escoger una de ellas

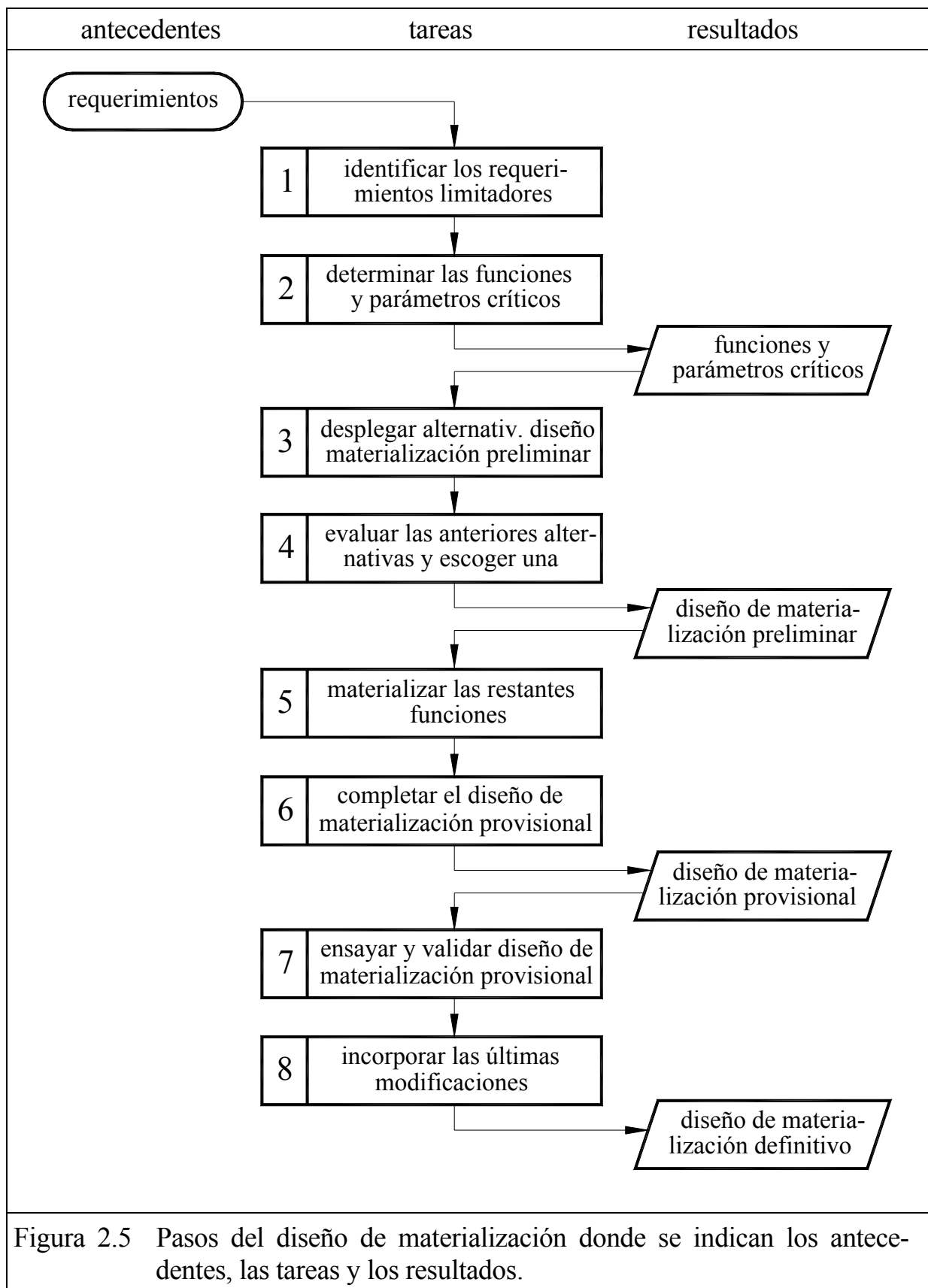
El paso siguiente consiste en evaluar las alternativas de diseño de materialización preliminar por medio de métodos de evaluación, como los presentados en la Sección 1.7, de criterios como las especificaciones limitadoras, y de ayudas como la *lista de referencia para el diseño de materialización* (más adelante en esta misma Sección)

El resultado es la elección de un *diseño de materialización preliminar* definido por medio de dibujos y esquemas con las disposiciones de elementos, formas y dimensiones.

Diseño de materialización preliminar

Solución del diseño de materialización que da respuesta a los requerimientos limitadores y a las funciones críticas y que resulta de la evaluación y de la elección de una de las varias soluciones alternativas desplegadas en base a las condiciones críticas.

Ejemplo: Continuando con el proyecto de Ibersélex S.A. (Figuras 1.8 y 2.4a), el diseño de materialización preliminar consistió en la determinación de la forma y dimensiones del eslabón (longitud; ancho; funciones, geometría de los distintos planos), la trayectoria de la guía, una primera selección de los materiales (cuerpo de la guía de aluminio recubierto de poliamida, para asegurar la estabilidad dimensional) y la disposición básica del sistema de accionamiento.



Lista de referencia para el diseño básico o de materialización	
Conceptos	Determinaciones
Concepto	¿Responde a las funciones y prestaciones especificadas? ¿Su funcionamiento es simple y eficaz? ¿Es fácil y económico de materializar?
Prestaciones	¿El conjunto y sus componentes proporcionan: resistencia y durabilidad adecuadas? deformaciones admisibles? estabilidad de funcionamiento? posibilidad de expansión? vida (fatiga, corrosión) y prestaciones adecuadas?
Seguridad	¿El conjunto y sus componentes ofrecen seguridad? ¿Se han considerado las perturbaciones externas? ¿Cumple las directivas de seguridad?
Ergonomía	¿Se ha tenido en cuenta la relación persona-máquina? ¿Se han evitado las situaciones de fatiga o estrés?
Entorno	¿Los consumos son adecuados? ¿Se ha previsto el fin de vida?
Producción	¿Se han analizado los procesos de fabricación? ¿Se han evaluado los utillajes necesarios? ¿Qué partes tienen que subcontratarse?
Calidad	¿Se ha previsto un funcionamiento robusto? ¿Qué verificaciones hay que hacer y cuándo?
Montaje	¿Los procesos de montaje son simples? ¿Se ha pensado en su automatización?
Transporte	¿Se ha considerado el transporte interno y externo? ¿Se tiene que poder desmontar? ¿Con qué utillajes?
Operación	¿Se han considerado todos los modos de operación?
Mantenimiento	¿Se ha estudiado que tipo de mantenimiento se requiere? ¿Se han facilitado las reparaciones?
Costes	¿Se mantienen los costes dentro de los límites previstos? ¿Qué costes adicionales aparecen y porqué?
Plazos	¿Se cumplen los plazos previstos? ¿Se prevén modificaciones que alteren estos plazos?

5. *Materializar las restantes funciones*

Una vez escogida una solución del diseño de materialización preliminar, donde se han tenido en cuenta los requerimientos limitadores y se han resuelto las funciones y parámetros críticos, debe completarse con la solución del resto de requerimientos, funciones y parámetros (diseño de materialización provisional).

No es de extrañar que una función que inicialmente no ha sido considerada crítica, lo sea en el momento de su materialización. En estos casos hay que proceder a través de iteraciones sucesivas.

6. *Completar el diseño de materialización provisional*

En este paso se completa el diseño de materialización provisional a partir de integrar todas las soluciones, tanto las que resultan de los requerimientos, funciones y parámetros críticos como las que resulten de los restantes, hasta que el producto o sistema quede definido del todo.

Diseño de materialización provisional

Solución global del diseño de materialización, aún no validado por el ensayo, que da respuesta al conjunto de los requerimientos, funciones y parámetros del producto.

El diseño de materialización provisional fija las disposiciones relativas, las formas y las dimensiones de todos los elementos y componentes del producto y se presenta en forma de uno o más planos de conjunto (en inglés, *layout*).

7. *Ensayar y validar el diseño de materialización*

Cuando un producto o sistema deba trabajar en condiciones duras o exigentes (desgaste, deterioro por fatiga, fluencia sota carga, ambientes corrosivos) conviene realizar uno o más prototipos del conjunto o de las partes más críticas a fin de ensayarlo y validarlo antes de iniciar la fabricación.

La realización de un prototipo exige la fabricación de piezas y componentes por lo que se requiere la realización de planos de pieza que corresponden a la etapa de *diseño de detalle*.

Debido a la circunstancia de que el diseño de materialización aún no ha sido validado, estos planos de pieza tienen que ser considerados provisionales y no adquieren la condición de planos de detalle definitivos hasta la etapa de diseño de detalle. La etapa de prototipaje y ensayo del diseño de materialización es de gran importancia para la validación de las soluciones. En general, requiere una definición de los objetivos y de los métodos de ensayo, una planificación de su preparación y ejecución y unos criterios de validación del producto (estas determinaciones se pueden agrupar en forma de un *protocolo de ensayo*, documento de gran utilidad, especialmente cuando existen relaciones de contratación en el desarrollo de estas actividades).

La validación de los ensayos representa la finalización del diseño de materialización, previa incorporación de las eventuales modificaciones en los planos de conjunto (paso siguiente).

8. Incorporar las últimas modificaciones

Éste último paso del diseño de materialización consiste en incorporar las modificaciones originadas en etapas anteriores en los planos de conjunto y, muy especialmente, las que son consecuencia del ensayo y de la validación.

Diseño de materialización definitivo

Solución completa del diseño de materialización validada por el ensayo.

Ejemplo 2.3

Materialización preliminar de un reductor de una etapa

A continuación se describen los primeros pasos de la materialización de un reductor de engranaje recto de una sola etapa. En principio se prevé incorporar rodamientos radiales (de bolas o de rodillos) y retenes radiales como componentes de mercado.

Requerimientos limitadores

Los requerimientos limitadores de la especificación del reductor son: RL_1) Potencia nominal: 4500 W; RL_2) Velocidad angular del árbol de entrada: 1430 min^{-1} ; RL_3) Vida: 25000 horas; RL_4) Relación de transmisión: $i=4$; RL_5) Cargas radiales exteriores admisibles sobre los árboles (cualquier dirección), y su situación: árbol de entrada, 750 N a 20 mm de la cara exterior del reductor; árbol de salida, 2250 N a 25 mm de la cara exterior del reductor.

Otros requerimientos, como el coste, los planos y puntos de sujeción de la carcasa, o el deseo de limitar al máximo el peso y las dimensiones, no se juzgan como requerimientos limitadores en este primer paso del diseño de materialización preliminar.

Funciones críticas y parámetros críticos

Las funciones que se consideran críticas en este diseño de materialización preliminar son: FC_1) Transmisión de la potencia; FC_2) Apoyo de los ejes (teniendo en cuenta las cargas externas); FC_3) Partición de la carcasa para el montaje (se contemplan el montaje radial, según Figura 2.6c, o el montaje axial).

Los parámetros críticos son aquellos que intervienen en la definición de las funciones críticas: PC_1) Distancia entre ejes, a , y anchura del engranaje, b ; PC_2) Diámetros de los árboles en la sección de los rodamientos, d_{1A} y d_{2D} (los otros dos diámetros, d_{1B} y d_{2C} , pueden ser menores); PC_3) Diámetros exteriores de los rodamientos, D_A , D_B , D_C y D_D (los diámetros interiores coinciden con los de los árboles); PC_4) Espacio para situar un tornillo de unión de las dos mitades de la carcasa entre los rodamientos.

En el tanteo inicial, para cubrir las anchuras de los rodamientos, los juegos axiales entre rodamientos y ruedas dentadas y la reserva de espacio para los retenedores, se toman unas distancias de 12 mm entre el plano de simetría de los rodamientos y las caras exteriores de las ruedas dentadas, y de 16 mm, entre el plano de simetría de los rodamientos y las caras exteriores de las carcasas (Figura 2.6a).

Condiciones críticas (cuantitativas y cualitativas)

Las funciones críticas junto con los requerimientos limitadores nombrados anteriormente imponen diversas condiciones cuantitativas y cualitativas: CCt_1) El engranaje debe funcionar durante la vida prevista sin fallar (dos condiciones cuantitativas: resistencia a la fatiga superficial; resistencia a fatiga en el pie del diente del piñón; CCt_2) Los árboles no deben fallar por sobrecarga o por fatiga durante su vida útil (dos condiciones cuantitativas en las secciones más críticas A y D); CCt_3) Los rodamientos no deben fallar durante la vida prevista (4 condiciones cuantitativas, una para cada rodamiento); CCl_1) La distribución de tornillos de la brida debe repartir la fuerza lo más uniformemente posible (1 condición cualitativa).

Establecimiento de las condiciones críticas

Gracias a los métodos de cálculo de los engranajes, es bien conocido que la condición cuantitativa de resistencia a la fatiga superficial (fuera de casos excepcionales) es más restrictiva que la de resistencia a la fatiga en el pie del diente. La primera impone una relación entre los parámetros básicos de la transmisión (distancia entre ejes y anchura del engranaje), mientras que la segunda impone un valor mínimo del módulo (generalmente se toman valores más grandes para evitar rupturas por sobrecargas).

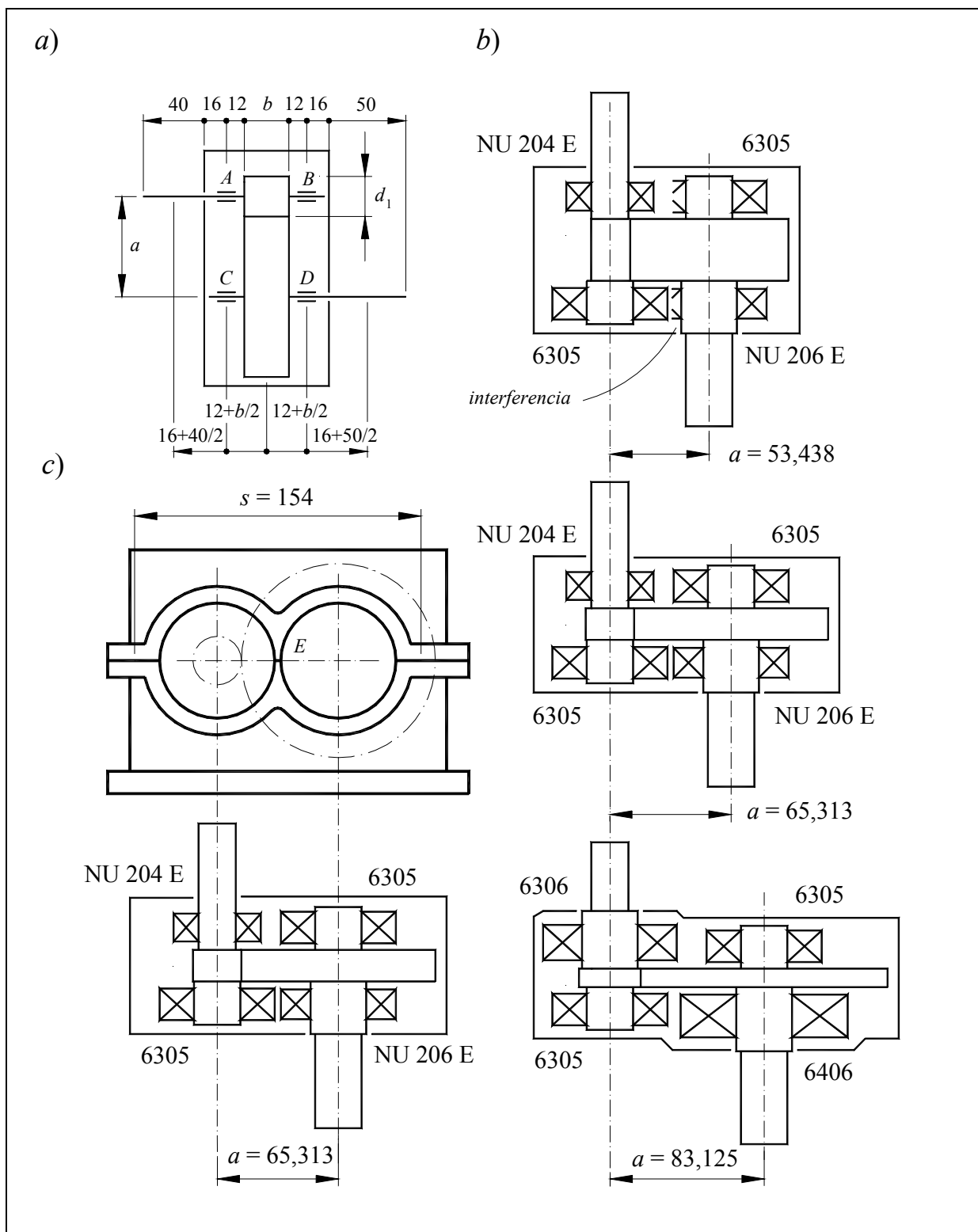
Mediante el cálculo de árboles sometidos a torsión (transmisión del par) y a flexión (fuerzas sobre los dentados, cargas radiales exteriores y reacciones sobre los rodamientos), se obtienen los diámetros mínimos de los árboles en las secciones críticas A y D .

Las dimensiones de los rodamientos se establecen por cálculo en base a las cargas que soportan, la velocidad angular y la vida. Las libertades de diseño se limitan al tipo de rodamiento (radiales de bolas, o radiales de rodillos, en el presente caso) y la elección de un diámetro interior mayor que el que resulta del cálculo del árbol.

Evaluación de parámetros

Se parten de los siguientes números de dientes y desplazamientos de piñón ($z_1=19$, $x_1=0.40$) y rueda ($z_2=76$, $x_2=-0.40$; equilibran los coeficientes de seguridad de la resistencia a la fatiga superficial). Tanteando diversos valores del módulo, en base al cálculo de engranajes de la norma ISO-6336 y manteniendo el factor de aplicación de 1,5 (los coeficientes de seguridad a fatiga superficial se ajustan a 1, mientras que los coeficientes de seguridad a rotura del pie de la diente por fatiga son muy superiores), se obtienen los resultados siguientes:

módulo	distancia entre ejes	anchura del engranaje	diámetro del piñón	relación	fuerza tangencial
m_0 (mm)	a (mm)	b (mm)	d_1 (mm)	b/d_1 (-)	F_t (N)
1,125	53,438	33,3	21,375	1,56	2810
1,250	59,375	22,0	23,750	0,93	2530
1,375	65,313	17,0	26,125	0,65	2300
1,500	71,250	13,9	28,500	0,49	2110
1,750	83,125	10,0	33,250	0,30	1810



Conocida la fuerza tangencial del engranaje, se calculan los árboles y rodamientos. Para simplificar, se ha considerado que los rodamientos soportan las cargas radiales exteriores del enunciado independientemente de su dirección. Dado que este requerimiento es muy exigente, se limita la vida de los rodamientos en el caso más desfavorable a 12500 horas (los fabricantes de reductores limitan el valor de la carga radial exterior admisible según su orientación, con unos resultados aproximadamente equivalentes al presente caso).

A partir de los pares torsores y de los momentos flectores en las secciones críticas A del árbol de entrada ($M_{tA}=30 \text{ N}\cdot\text{m}$; $M_{fA}=27 \text{ N}\cdot\text{m}$) y D del árbol de salida ($M_{tD}=120 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $M_{fD}=92,25 \text{ N}\cdot\text{m}$), se calculan los diámetros mínimos (ver tabla).

Para obtener el valor mínimo de la carga básica C (catálogos de rodamientos) en el cálculo de los rodamientos del árbol de entrada (12500 horas y 1430 min^{-1}), debe multiplicarse la carga dinámica, P (coincide con las reacciones R), por un factor 10,2 y, para el árbol de salida (12500 horas y $357,5 \text{ min}^{-1}$), por un factor de 6,4.

Diámetros mínimos de los árboles y cálculo de rodamientos

módulo	fuerza tangenc.	reac. máximas carga dinámica		diámet. árboles	carga básica		rodamientos	
		$R_A=P_A$ $R_B=P_B$	$R_C=P_C$ $R_D=P_D$		d_A d_D	C_A C_B	C_C C_D	A B
(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN)		
1,125	2,81	2,63 1,88	5,27 3,02	>15,6 >24,1	26,8 19,1	33,7 19,3	NU 204 E 6305	6305 NU 204 E
1,375	2,30	2,56 1,85	5,65 3,40	>15,6 >24,1	26,1 18,4	36,2 21,8	NU 204 E 6305	6305 NU 204 E
1,750	1,81	2,45 1,70	5,87 3,62	>15,6 >24,1	25,0 17,3	37,6 23,2	6306 6305	6305 6406

Características de los rodamientos elegidos

	6305	6306	6406	NU 204 E	NU 206 E
$d\cdot D\cdot B$ (mm)	25·62·17	30·72·19	30·90·23	20·47·14	30·62·16
C (kN)	22,1	29,2	42,2	28,0	41,4
peso (kg)	0,220	0,331	0,689	0,140	0,220

La figura 2.6b muestra las alternativas estudiadas. La primera da lugar a interferencia entre los rodamientos, la tercera permite el uso de rodamientos de bolas (aún así muy desproporcionados); la mejor parece ser la segunda, con rodamientos de rodillos en los soportes más críticos A y D . Sin embargo, la solución intermedia no permite un montaje radial ya que, al no poderse colocar una unión atornillada en el plano de partición entre los rodamientos, dejaría libre una distancia excesiva ($s=154 \text{ mm}$; Figura 2.6b). El montaje, entonces, tendría que ser axial.

Generación de variantes por inversión

Una de las formas más interesantes de originar variantes alternativas en el diseño de materialización es la inversión de funciones entre dos o más elementos de un sistema (el miembro conductor pasa a ser conducido y viceversa) o de características (la rosca interior pasa a ser exterior y viceversa). Las variantes generadas por inversión pueden dar lugar a valoraciones muy diferentes en relación a aspectos como las dimensiones exteriores, la precisión necesaria, la facilidad de fabricación, el comportamiento a fatiga de determinados elementos o la seguridad del sistema, por lo que constituyen soluciones alternativas en el diseño de materialización.

A continuación se analizan los diferentes ejemplos de variantes alternativas generadas por inversión (Figura 2.7):

a) Sistema de muelle de tracción

La solución de la izquierda es un simple muelle a tracción con ganchos en los extremos, mientras que la solución de la derecha se basa en un muelle a compresión que actúa sobre unos platos extremos unidos a unos vástagos (uno pasa por dentro del otro) de manera que el efecto global es el de un muelle a tracción.

La primera solución, más sencilla y barata, presenta el inconveniente de que, en caso de ruptura del muelle, se desconectan las partes enlazadas (lo que en algunas aplicaciones puede comportar una falta de seguridad) mientras que, en la segunda solución, una ruptura del muelle no da lugar a una desconexión de las partes, sino tan solo la caída de la espira rota sobre la espira adyacente.

Los muelles de las suspensiones de lavadoras industriales medianas y grandes adoptan la segunda solución.

b) Tensor entre dos barras

La solución de la izquierda une dos barras huecas y roscadas interiormente, mientras que la solución de la derecha une dos barras macizas y con rosca exterior. Las dos soluciones permiten el tensado entre las dos partes.

La adopción de una solución u otra puede depender de cual sea la forma de las barras a tensar (hueca o maciza). En caso de que el sistema esté sometido a flexión lateral, la solución de la derecha distancia los puntos críticos de inicio de las roscas.

c) Guiado horizontal de un gancho

El soporte del gancho puede moverse horizontalmente según un sistema de guiado perpendicular al plano de la figura. La variante de la izquierda adopta una guía en forma de viga de doble T y doble línea de ruedas de apoyo por encima y por debajo de la viga, mientras que la variante de la derecha adopta una sola línea de ruedas de apoyo y dos guías en forma de viga en T por encima y por debajo.

La variante de la izquierda tiene la ventaja de que las ruedas de apoyo pueden girar libremente en sentidos contrarios (por tanto, puede ajustarse tanto como convenga las ruedas a la guía, incluso precomprimirlas). En cambio, en la variante de la de-

recha, la misma rueda de apoyo gira en sentidos contrarios si toma contacto con la guía inferior o con la guía superior (por lo que hay que dejar un juego entre rueda de apoyo y las guías y de ninguna manera puede precomprimirse las ruedas de soporte contra las guías).

d) Unión estanca entre dos tubos

Este sistema se compone de los dos tubos con los extremos cónicos (uno exterior y otro interior) y una tuerca que aprieta entre sí las dos partes.

La adopción de una u otra variante depende fundamentalmente de criterios de fabricación y de espacio (la variante de la izquierda tiene menos diámetro y más longitud y la de la derecha tiene menos longitud y más diámetro).

e) Acoplamiento entre dos árboles

Este es un tipo de acoplamiento entre árboles a través de unos dentados exteriores e interiores. En la variante de la izquierda, los extremos de los árboles son solidarios a los dentados exteriores y el elemento intermedio al dentado interior; mientras que, en la variante de la derecha, los extremos de los árboles son solidarios a los dentados interiores y el elemento intermedio al dentado exterior. Debido a la forma levemente abombada de los dentados solidarios a los extremos de los árboles, este acoplamiento permite un cierto grado de desalineación angular entre los extremos de los ejes.

La elección de una u otra variante depende fundamentalmente, como en el caso anterior, de criterios de dimensionado y de fabricación.

f) Guiado del cuerpo de una válvula

En la variante de la izquierda, el guiado se basa en un vástago fijo a la base sobre el que desliza la válvula mientras que, en la variante de la derecha, el vástago forma parte de la válvula y se desliza sobre una guía que forma parte de la carcasa.

La adopción de una u otra variante debe tener en cuenta la calidad del guiado (longitud, situación y materiales de la zona de guiado, lubricación) y las facilidades de fabricación (tolerancias, acabados superficiales).

g) Articulación de una rueda dentada loca

En la variante de la izquierda, la rueda dentada es solidaria al árbol que se articula por medio de rodamientos a la base mientras que, en la variante de la derecha, la rueda dentada se apoya por medio de rodamientos directamente sobre el eje fijo a la base.

La primera variante somete el árbol a fatiga a causa de su giro (requiere un diámetro mayor), pero permite transmitir el par a través de uno de sus extremos, mientras que la segunda variante no somete el eje a fatiga (el diámetro puede ser mucho menor), pero sólo es válida para ruedas dentadas intermedias.

Esta segunda variante es la solución adoptada en el apoyo de la mayor parte de las ruedas de vehículos (bicicletas, motocicletas, automóviles).

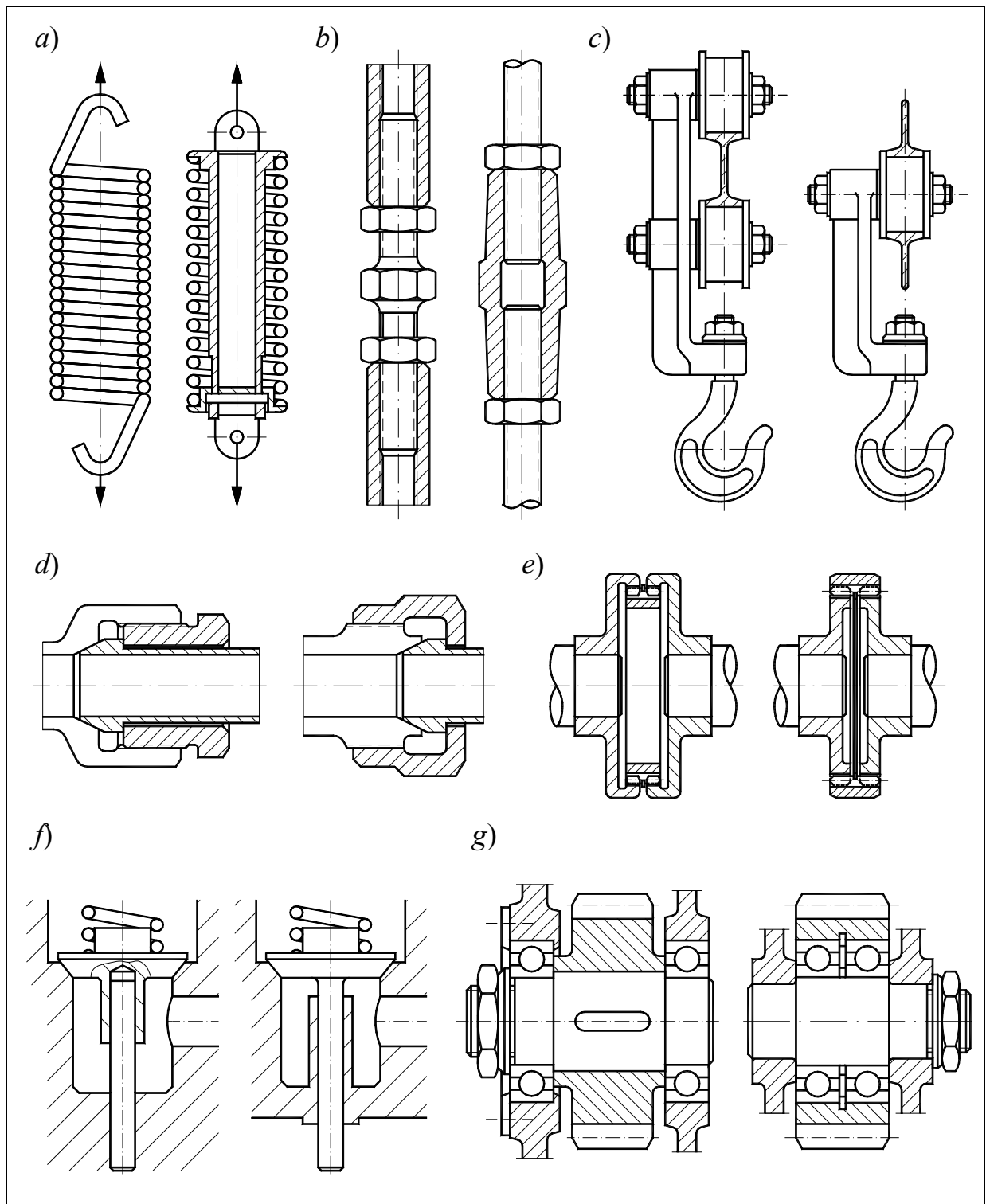


Figura 2.7 Generación de alternativas por permutación de funciones o características entre dos elementos: *a)* Sistema de muelle a tracción; *b)* Tensado entre dos barras; *c)* Guiado horizontal de un gancho; *d)* Unión estanca entre dos tubos; *e)* Acoplamiento entre dos árboles; *f)* Guiado de una válvula; *g)* Articulación de una rueda dentada loca.

Establecimiento de un protocolo de ensayo

El ensayo es uno de los pasos fundamentales en el diseño de materialización donde las empresas dedican importantes recursos humanos, materiales y de tiempo. Por lo tanto, es conveniente presentar el ensayo de forma ordenada por medio del establecimiento de un protocolo de ensayo. Este documento es interesante en todos los casos, pero es especialmente conveniente cuando en las tareas de ensayo se dan relaciones de subcontratación.

Los ensayos bien conducidos y documentados constituyen una parte fundamental del *know-how* de las empresas.

El protocolo de ensayo constituye un pequeño proyecto del ensayo y que debe contener, como mínimo, los siguientes aspectos:

a) *Definición de los objetivos del ensayo*

En primer lugar, hay que definir lo que se quiere ensayar y que se quiere obtener. El objetivo principal de los ensayos de fiabilidad en la etapa de diseño de materialización es comprobar el correcto funcionamiento de un producto a lo largo de su vida prevista. También conviene tener presentes otros aspectos complementarios (y no menos importantes) del ensayo como la medida de las prestaciones reales del producto o la obtención de datos que pueden constituir una ayuda fundamental en futuros proyectos de la empresa (son parte fundamental de su *know-how*).

b) *Diseño del ensayo*

Raramente se puede realizar el ensayo en condiciones operativas durante toda la vida útil del producto (coste económico y tiempo excesivos), por lo que hay que prever condiciones de funcionamiento simuladas y ensayos acelerados.

Una vez definidos los objetivos, el diseño del ensayo debe determinar unos *principios de ensayo* y unos *principios de medida* que, además de ser representativos de las condiciones reales de funcionamiento del producto o sistema, también deben ser compatibles con los medios y el tiempo de que se dispone.

c) *Planificación del ensayo*

Tiene por objeto prever los medios necesarios para realizar el ensayo (prototipo, banco de ensayo, sistemas de medida) así como su distribución en el tiempo (los ensayos de fiabilidad pueden ser muy prolongados).

d) *Preparación del prototipo y del banco de ensayo*

Uno de los puntos clave y a la vez críticos para la operatividad de un ensayo es la preparación de los prototipos y de los medios para el ensayo.

En esta etapa, los prototipos se basan en el diseño de materialización provisional (totalmente definido); las dificultades están en los costes y plazos.

La preparación de los medios para el ensayo requiere la adaptación de un banco ya existente o el diseño y fabricación de un banco específico, por lo que conviene que sea una de las primeras acciones que se planifica.

Hay que prever especialmente los medios de medida y de registro de datos e incidencias del ensayo. Terminadas las pruebas, difícilmente pueden repetirse y, entonces, puede lamentarse el no haber realizado determinados registros.

f) *Interpretación y validación de los resultados*

Es un paso determinante ya que de él se derivan las consecuencias del ensayo. Aunque en la etapa de diseño del ensayo ya deben haberse previsto los criterios de interpretación y de validación, las incidencias que se producen durante su realización normalmente dan lugar a situaciones imprevistas y nuevos conocimientos que obligan a su revisión.

En función de la interpretación de los resultados de los ensayos, hay que tomar la decisión de validar el producto o proponer mejoras y repetir el ensayo. En caso extremo, puede ser recomendable abandonar la solución o el proyecto.

Caso 2.3

Protocolo de ensayo para un módulo de andén de geometría variable

Este protocolo tiene por objeto definir el ensayo de un módulo de andén de geometría variable que forma parte de un sistema de seguridad promovido por Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya S.A. (ver la Figura 1.6), destinado a ser implantado en estaciones en curva de ferrocarriles metropolitanos (andén y vagón en el mismo nivel) a fin de evitar la caída accidental de pasajeros (de consecuencias graves) en los espacios entre la curva del andén y la poligonal que forma el tren. El sistema está formado por diversos módulos alineados con el andén que se despliegan delante del convoy cuando éste se ha parado y que se repliegan antes que continúe la marcha.

Uno de los objetivos manifestados por la empresa es asegurar una elevada fiabilidad en el funcionamiento de un módulo, ya que la fiabilidad global del sistema es mucho más baja al funcionar un número elevado de módulos simultáneamente.

Definición de los objetivos del ensayo

Fundamentalmente, se desea comprobar que el módulo realiza las maniobras correspondientes a su vida útil sin fallar y en condiciones análogas a las de utilización. En caso de fallo, deberá mejorarse el diseño y comprobar de nuevo que no falla.

Las pruebas deben garantizar la funcionalidad y fiabilidad de un módulo instalado en base a las siguientes consideraciones: a1) Las maniobras y estados de carga del ensayo deben ser representativas de las de servicio; a2) La secuencia del ensayo debe prever la utilización sistemática y exhaustiva de todos los mecanismos de accionamiento y sistemas de seguridad del módulo (contacto con el tren, no contacto con el tren, sensor de módulo replegado, varias formas de aplicación de la carga, detección de carga mínima, deformación limitada a carga máxima), así como de los elementos de control; a3) El nivel de severidad de las pruebas y el número de ciclos deben ser representativos de la utilización del módulo en un andén.

Diseño del ensayo

Para obtener un alto grado de fiabilidad del módulo se acuerda realizar un número de maniobras correspondiente a la totalidad de la vida, o sea 360.000 (10 años; 100 maniobras/día; 360 días/año). Todas las pruebas de carga se realizan con la máxima extensión de la plataforma después de tocar el tren (*toca-tren*) y retroceder unos 80 a 100 mm hasta pararse (*a-sitio*) a fin de dejar espacio para abrir las puertas por el exterior del vehículo. Los módulos disponen de sensores que detectan las posiciones de máxima extensión (*seg-av*) y replegada (*seg-ar*) de la plataforma.

Se prevén los siguientes tipos de maniobras de ensayo que simulan diversas formas de utilización (toca o no toca el tren al desplegarse) y de carga (pies alternativos, pies simultáneos, sin carga, máxima carga) sobre la plataforma móvil: *Maniobra A* (168.200 ciclos y 47% del ensayo): despliegue de la plataforma hasta *toca-tren* y retroceso hasta *a-sitio*, cargas alternativas (10 veces, que simulan 10 pies) de 750 N en los laterales de la zona central de la plataforma extensible (cilindros neumáticos *A1-A2*, Figura 2.8), y repliegue hasta que actúa *seg-ar*; *Maniobra AA* (168.200 ciclos y 47% del ensayo): las mismas condiciones que la maniobra anterior pero con carga simultánea (5 veces dobles, que simulen 10 pies); *Maniobra B* (14.400 ciclos y 4% del ensayo): despliegue de la plataforma hasta *toca-tren* y retroceso hasta *a-sitio*, carga de 2000 N (1 vez) en el extremo de la plataforma (cilindro neumático Figura 2.8), y repliegue hasta que actúa *seg-ar*; *Maniobra 0*: (7.200 maniobras y 2% del ensayo): despliegue de la plataforma sin encontrar el tren (actúa *seg-av*) y repliegue automático hasta que actúa *seg-ar*.

Además de estas maniobras hay dos más que se programan de forma aleatoria intercaladas durante la realización del resto de maniobras, y que son: *Carga Mínima* (10 veces/día, aleatoria): actúa el cilindro *E*, de 100 N (simula la fuerza mínima sobre la plataforma, por ejemplo, el peso de un niño) para comprobar si funciona el sistema de detección de carga (mientras actúa, la plataforma no debe replegarse, aunque se dé esta orden); *Carga máxima* (1 vez/día, durante 15 minutos, aleatoria): actúan simultáneamente los cilindros neumáticos *C* y *D* en los centros de la plataforma móvil (1500 N), y fija (3000 N).

Finalmente, se prevé crear condiciones de trabajo adversas, análogas a las de servicio: *a) Funcionamiento a la intemperie*: permanente (algunas estaciones están al aire libre); *b) Objetos en la plataforma*: tirar arena, cigarrillos, papeles sobre la plataforma (1 vez/semana); *b) Regar con agua*: simula la lluvia u operaciones de limpieza (1 vez/semana).

Planificación del ensayo

El tiempo de una maniobra completa del tipo *A* (el 94 % del ensayo) se evalúa entre 10 y 11 segundos (las maniobras *B* y *0* tienen duraciones ligeramente inferiores, aunque su incidencia en el tiempo total es mucho menor). Además, cada día se prevé una maniobra de *carga máxima* (20 minutos) y aleatoriamente, 10 maniobras de *carga mínima*, cuya incidencia en el tiempo total es menospreciable

El tiempo total de ensayo sin interrupciones es de 42,3 días (360.000 maniobras a 10 segundos/maniobra + 42 maniobras de *carga máxima* de 20 minutos/maniobra). Sin embargo, por diversas causas (incidencias en el módulo, en el banco de ensayo, interrupciones eléctricas, inspecciones, vacaciones), es difícil de asegurar más allá del 50 % del tiempo en funcionamiento, lo que significa 85 días de ensayo (cerca de 3 meses).

La distribución de los ensayos se prevé en tres fases:

Fase preliminar

Tipo de ensayo		Ciclos	% ensayo
0	Maniobras en vacío	1440	0,4
B	Carga en el extremo (2000 N)	720	0,2
A	Pies alternativos (750 N)	16920	4,7
AA	Pies simultáneos (750 N)	16920	4,7

Primera fase

Tipo de ensayo		Ciclos	% ensayo
0	Maniobras en vacío	5760	1,6
B	Carga en el extremo (2000 N)	2880	0,8
A	Pies alternativos (750 N)	67680	18,8
AA	Pies simultáneos (750 N)	67680	18,8

Segunda fase

Tipo de ensayo		Ciclos	% ensayo
0	Maniobras en vacío	7200	2,0
B	Carga en el extremo (2000 N)	3600	1,0
A	Pies alternativos (750 N)	84600	23,5
AA	Pies simultáneos (750 N)	84600	23,5

Prototipo y banco de ensayo

Dado que se desea realizar un ensayo global del módulo para un número de maniobras correspondiente a su vida total, se construye un *prototipo* completo basado en el diseño de materialización provisional.

Se diseña un *banco de ensayo* específico que consta de las siguientes partes (Figura 2.8): *a*) Una base en la cual descansa el módulo con tres puentes donde se sujetan los cilindros neumáticos que simulan las diferentes fuerzas; *b*) Una simulación del tren (puede inclinarse para reproducir el contacto ligeramente no paralelo que a veces se produce entre la plataforma y el tren); *c*) Dos cilindros *A1* y *A2* de 750 N de fuerza cada uno, a ambos lados de la zona central de la plataforma

desplegada, para simular los pies alternativos y los pies simultáneos; *d*) Un cilindro *B* de 2000 N de fuerza para simular sobrecargas puntuales en el extremo de la plataforma desplegada; *e*) Un cilindro *E* de 100 N de fuerza para comprobar que el peso equivalente de un niño situado en una posición atrasada y en un lado de la plataforma, es detectado por el sensor de carga (evita que la plataforma se repliegue con alguien encima); *f*) Cilindros de carga máxima *C* y *D*, de 1500 N y 3000 N respectivamente (equivalente a 5000 N/m² de sobrecarga máxima en locales públicos), que actúan en los centros de las plataformas extensible y fija; *g*) Un control por medio de ordenador que gobierna el conjunto del ensayo (maniobras automáticas, gestión del ensayo y registro de incidencias).

Interpretación y validación de los resultados

El criterio general de validación del diseño del módulo de andén de geometría variable es que el sistema y sus partes sean capaces de realizar el número de maniobras previsto para su vida completa sin fallar ni deteriorarse. En caso contrario, debe adoptarse un diseño alternativo y ensayarlo de nuevo.

Se realizó una primera ronda de ensayos completa con un primer prototipo que dio lugar a un gran número de incidencias (muchas de ellas causadas por el prototipo pero, otras, causadas por el banco de ensayo) que obligó al rediseño y fabricación de soluciones alternativas. Su duración fue de 278 días (más de 9 meses).

Las principales incidencias consistieron en:

- a*) La plataforma móvil se había formado encolando sobre una base de aluminio varias placas estriadas de mercado (de tipo escalera mecánica), pero el ensayo las separó. Se probó de nuevo con soldadura (antes se había evitado a causa de las paredes muy finas de aluminio) con resultados positivos en el proceso y en el ensayo.
- b*) Los sensores neumoelectrónicos (basados en la actuación neumática de una cámara deformable sobre un microrruptor) no resultaron adecuados para el sensor de detección del *toca-tren* (excesivamente débil, se rompía) ni para el sensor de carga de la plataforma extensible (difícil de regular, de funcionamiento aleatorio). Se sustituyeron por sistemas mecánicos que actúan directamente sobre microrruptores.
- c*) Sistema deficiente de guías (desalineaciones demasiado sensibles, desgastes excesivos). Se resolvieron con un nuevo diseño de los patines de la plataforma extensible y con el recubrimiento de cromado duro de las partes que deslizan.
- d*) El conjunto de freno estaba mal soportado y rozaba. Al dar una solución alternativa se aprovechó para cambiar el material de acero inoxidable a aluminio de elevada dureza (mejor mecanización y menor peso). El ensayo avaló la alternativa.
- e*) Se produjeron fallos de las electroválvulas del módulo. Se sustituyeron por componentes más fiables a la vez que se establecieron las condiciones de suministro del aire comprimido.

Posteriormente, se realizó una segunda ronda de ensayos completa con un nuevo prototipo que incorporaba todas las modificaciones que duraron 87 días y dieron resultados satisfactorios.

Al final de la segunda ronda de ensayos se procedió a hacer una revisión general del módulo y de todos sus subsistemas y el resultado global fue satisfactorio. Sin embargo, se descubrió que uno de los muelles de lámina del soporte de la barra de *toca-tren* se había roto (su guiado resultaba muy deficiente). Sin embargo, esta rotura no se había traducido en un fallo de funcionamiento.

Se diseñó una solución alternativa del muelle. Para ensayarla, se hizo una adaptación sobre el mismo banco consistente en un actuador aplicado directamente sobre la barra de *toca-tren* con una frecuencia elevada (4 actuaciones por segundo) y una fuerza de 250 N. El ensayo de las 360.000 maniobras se llevó a término en 3 días y dieron un resultado positivo.

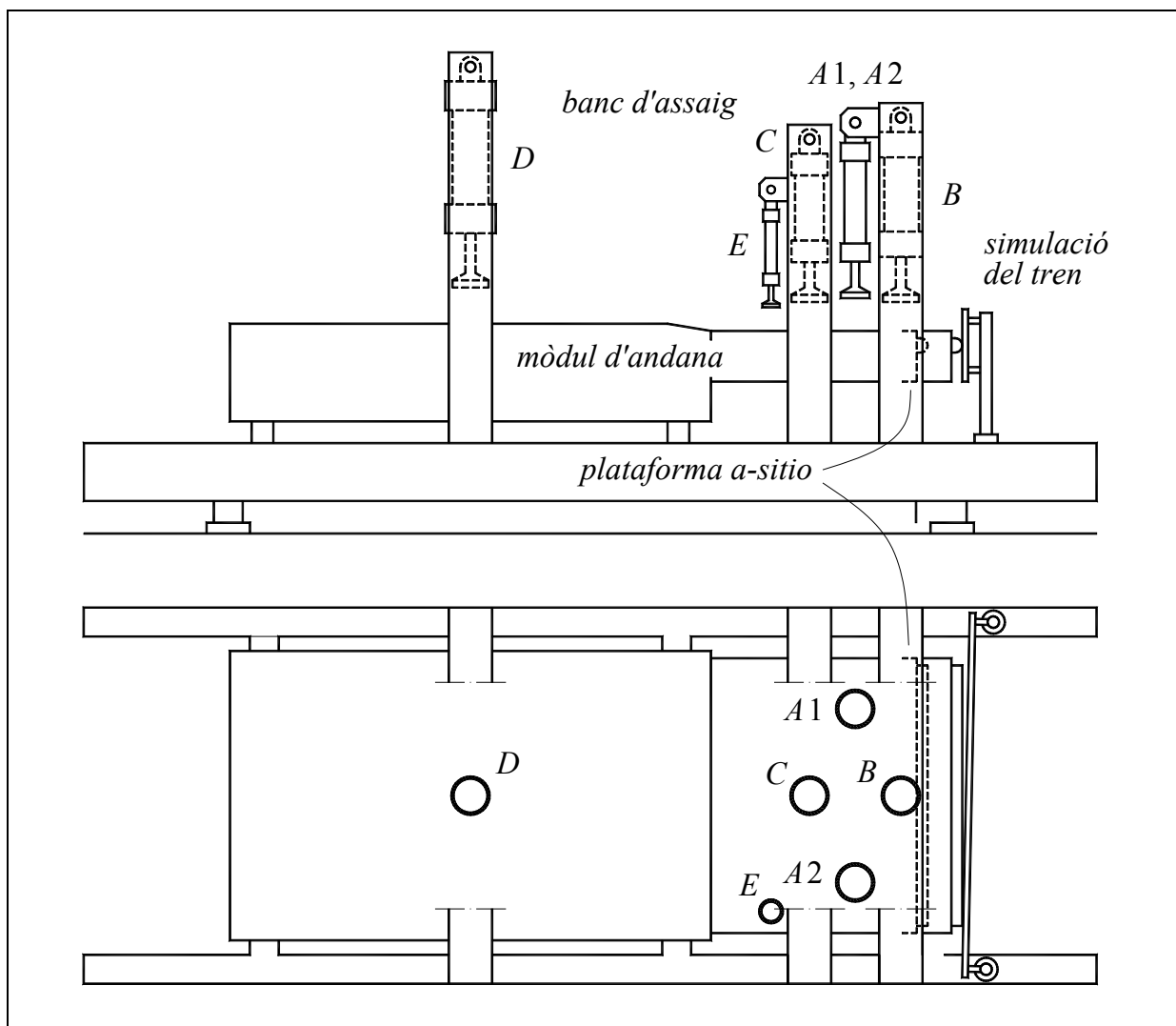


Figura 2.8 Esquema del banco de ensayo del módulo de andén de geometría variable (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya S.A.; ver también Figura 1.6), con la disposición de los diferentes cilindros para simular las diferentes acciones de carga sobre el prototipo.

2.7 Documentar la fabricación

Como ya se ha comentado en la Sección 2.3, el *diseño de detalle* (última etapa del proceso de diseño) tiene como objetivo fundamental, a partir de los planos de conjunto, completar la determinación de las piezas y preparar la documentación del producto destinada a la fabricación. Los resultados de esta actividad se dan por medio de los planos de piezas, de los listados de componentes y de los esquemas de montaje.

Aunque sea muy importante completar la determinación de las piezas y documentar la fabricación, el diseño de detalle puede y debe ir más allá haciendo propuestas para simplificar las soluciones y realizando una revisión general del proyecto, puntos que se analizan en los apartados siguientes.

Completar la determinación de piezas y componentes

La primera tarea del diseño de detalle es, pues, completar la determinación de cada pieza y componente en todos los detalles que hacen posible su fabricación:

Determinar la geometría y los materiales

Formas y dimensiones

El diseño de materialización fija las principales formas y dimensiones de las piezas y componentes a partir de cálculos, simulaciones y otras consideraciones funcionales.

El diseño de detalle debe fijar el resto de formas y dimensiones para completar su definición (suelen prevalecer criterios como la facilidad de fabricación y de montaje, la optimización del espacio y del peso o la disminución del coste).

Tolerancias

Durante el diseño de detalle corresponde determinar las cadenas de cotas que cubren las diferentes funciones esenciales para el buen funcionamiento del sistema. Las tolerancias se indican en los diferentes planos de pieza.

Radios de acuerdo, chaflanes

La geometría de una pieza o componente se debe completar en detalles como los radios de acorde (algunos de ellos tienen importancia funcional, como en la fatiga o en el asentamiento de rodamientos) y los chaflanes.

En algunos casos se indica matar eliminar (prácticamente quitar rebabas y evitar cantos vivos que podrían producir heridas).

Determinación de materiales y procesos

El diseño de materialización fija los materiales de las piezas y componentes de mayor responsabilidad y establece indicaciones genéricas (acero, aluminio, plástico) en componentes de compromiso menor.

Los planos de pieza (con independencia de su responsabilidad) deben indicar de forma precisa el material y cuando convenga, hacer indicaciones sobre procesos de fabricación (especialmente los tratamientos térmicos y superficiales).

Determinar los acabados

Recubrimientos

Hay varios motivos para recubrir las piezas: *a)* Estéticos (pinturas, anodizado, niquelado); *b)* Evitar la oxidación (selladores, pinturas, polímeros); *c)* Resistir el desgaste (recubrimientos cerámicos); *d)* Mejorar el deslizamiento (poliamida, PTFE). A menudo, un recubrimiento realiza más de una función.

Implantación de cables y de conducciones

Éste acostumbra a ser uno de los aspectos fundamentales que ya deben haberse previsto en etapas anteriores del proyecto. Sin embargo, suele ser en esta etapa cuando se consolidan las soluciones.

Determinación de lubricantes, y otros fluidos

Debe determinarse el tipo de lubricante (grasa, aceite, lubricante sólido), la cantidad y las formas de realizar el mantenimiento y el engrase.

También deben determinarse otros fluidos que intervienen en el sistema (calidad del agua o del aire comprimido, fluidos criogénicos, detergentes, tintes).

Lista de piezas y componentes

Junto a los planos de detalle y la información sobre los componentes de mercado, es de gran importancia la confección de la lista de piezas y componentes que intervienen en la fabricación de un producto o de una máquina.

Para una correcta gestión de la información relacionada con las piezas y componentes de un producto, es necesaria una adecuada codificación. En general, cada empresa se diseña su propio sistema de codificación teniendo en cuenta conceptos de atributos de diseño y atributos de fabricación (ver Sección 3.2). Conviene que los sistemas de codificación de piezas y componentes incluyan los siguientes aspectos como información asociada:

- a)* Subministrador, plazos de entrega, coste
- b)* Módulos a los que pertenece (estructuración modular)
- c)* Procesos de fabricación, máquinas y tiempo que requieren
- d)* Útiles de forma (muelles, matrices, filas) en caso de existir

Los nuevos sistemas informáticos PDM (*product data management*) permiten gestionar la información generada durante el diseño de los productos (y posteriores modificaciones) en una base de datos común a los distintos departamentos de la empresa (finanzas, I+D, fabricación, compras, comercial). Así, pues, la importancia del diseño irá en aumento durante los próximos años.

Simplificar las soluciones

Como ya se ha dicho, el diseño de detalle constituye una magnífica ocasión para simplificar las piezas y disminuir la complejidad de los sistemas.

Algunos puntos en los que esta tarea de simplificación es más eficaz son: *a)* Disminuir el número y tipos de elementos de unión (tornillos, tuercas, arandelas, pasadores, chavetas, remaches), de elementos de guiado (cojinetes, rodamientos, guías lineales) y otros componentes de uso frecuente; *b)* Eliminar variantes en componentes análogos (unificar soluciones, evitar componentes con mano); *c)* Refundir, si es posible (ver criterios en la Sección 3.3), dos o más piezas en una.

Caso 2.4

Disminuir los tipos de elementos de unión

En la etapa de diseño de detalle del proyecto de andén de geometría variable (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya S.A.), tras revisar las diferentes uniones atornilladas, se eliminaron algunos elementos, pero sobretodo, se redujeron en un 30% los tipos de tornillo y en menor proporción los tipos de tuerca y arandela.

En el diseño de detalle definitivo hay: 138 tornillos de 23 tipos diferentes (combinaciones de: material acero inoxidable AISI 304; cabezas Allen cilíndrica y Allen cónica; métricas M4, M5, M6, M8, M10; longitudes de 10, 12, 16, 20, 30, 35, 40, 45, 60 y 70); 57 tuercas de 8 tipos diferentes (combinaciones de: normales y autoblocantes; las mismas métricas que los tornillos); 8 arandelas de 3 tipos diferentes.

Cas 2.5

Unificar los patines del soporte de la plataforma móvil

En el mismo proyecto del caso anterior, se revisó la solución inicial del sistema de patines de apoyo de la plataforma móvil: los patines de un lado tenían una entalla para la pestaña de guiado y los patines superiores eran diferentes de los inferiores (4 componentes distintos).

Después del rediseño, que obligó a retocar numerosas cotas para centrar el apoyo de la plataforma entre la guía inferior y superior y a introducir una entalla no funcional en el lado opuesto, los 6 patines son iguales (Figura 2.9a). Entre otros, esta solución facilita la fabricación y el mantenimiento.

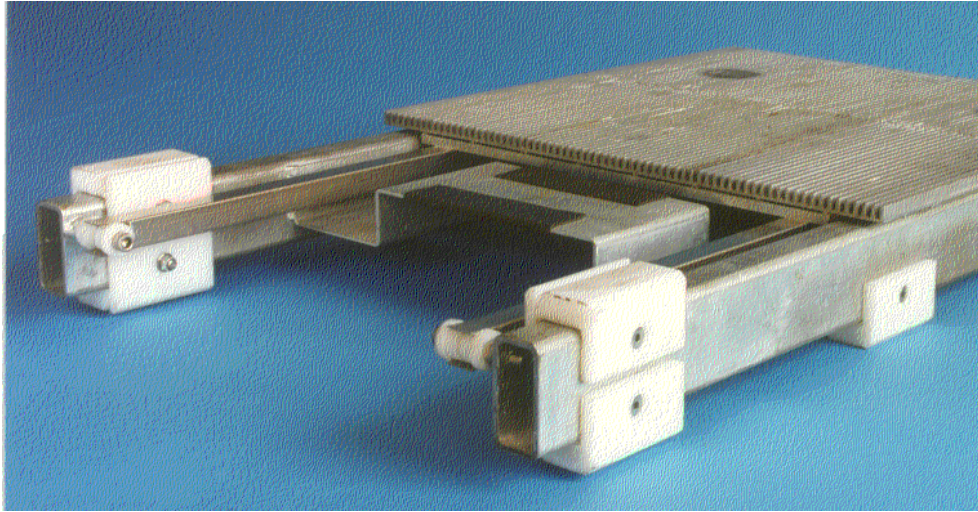
Cas 2.6

Evitar la mano (simetrías a derecha o izquierda) en un dispositivo de muelle-sensor de apoyo del suelo móvil

En el mismo proyecto del caso anterior, la solución inicial de los dispositivos de muelle-sensor (apoyo del suelo móvil y detección de la carga) tenían mano al estar dispuestos simétricamente sobre el soporte de la plataforma móvil.

Un análisis crítico de esta solución hizo ver que una colocación antisimétrica de un mismo dispositivo de muelle-sensor respecto al soporte de la plataforma móvil (Figura 2.9b), evitaba que éste tuviera mano (disminución de la complejidad).

a)



b)

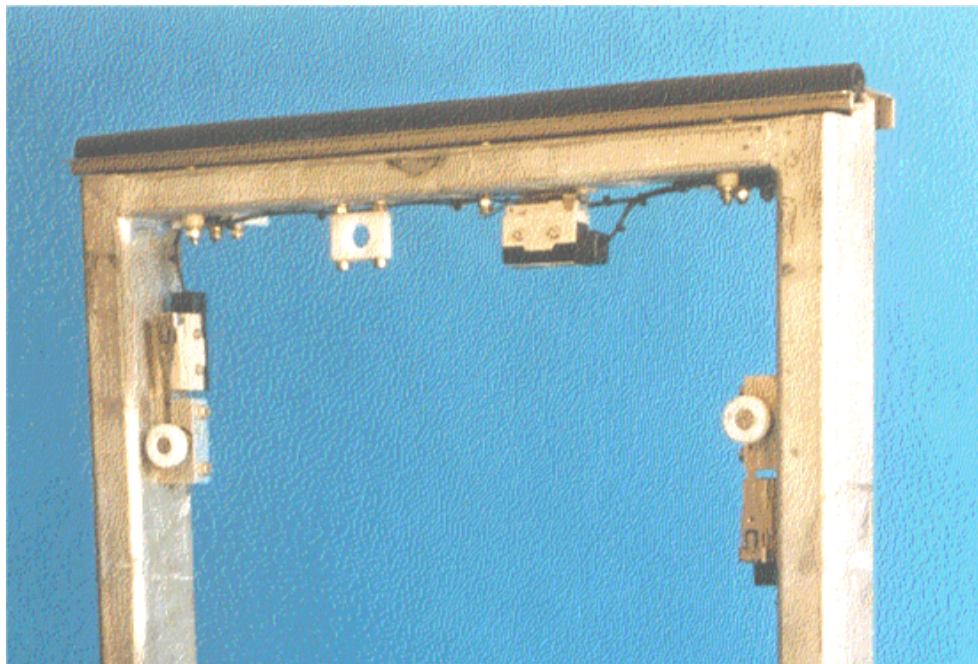


Figura 2.9 Módulo de andén de geometría variable (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya S.A.; ver también las Figuras 1.6 y 3.17):

a) Guiado de la plataforma móvil por 6 patines iguales;

b) Colocación antisimétrica de dos dispositivos de muelle-sensor (donde se apoya el suelo móvil) en el marco de la plataforma móvil, disposición que evita la mano (los dos conjuntos son iguales).

Revisar el proyecto

Una última función del diseño de detalle es revisar que todas las partes y todos los aspectos del proyecto concuerden. Es importante que esta revisión se realice de forma metódica, a cuyo fin son de gran utilidad las listas de referencia para el diseño de detalle. Debido a la gran diversidad de tipos de productos y procesos de las diferentes empresas, parece adecuado que estas listas de referencia sean elaboradas por profesionales de la empresa en base a la experiencia de proyectos anteriores.

En todo caso, conviene tener en cuenta los siguientes puntos:

Revisar que se cumplan todas las funciones

Debe revisarse que el producto cumpla todas las funciones, tanto las que corresponden a los modos de operación principales como también a los modos de operación ocasionales y accidentales (ver Sección 3.1).

Por ejemplo, debe comprobarse que: Los distintos elementos y sistemas están correctamente dimensionados; Las cadenas de cotas y tolerancias aseguran las distintas funciones de movilidad y sujeción de piezas y componentes; Las juntas y pasos de cables son compatibles con los requerimientos de estanqueidad.

En los modos de operación ocasionales o accidentales es donde con más frecuencia se producen olvidos o desajustes: ¿Cómo se mantiene y repara?; ¿Cómo se transporta y cómo se guarda?; ¿Qué pasa cuando falla la corriente?; ¿Cómo puede actuar un usuario inexperto?

Comprobar que sea fabricable

Debe asegurarse que todas las piezas son fabricables y dar alternativas cuando se presenten dificultades (por ejemplo: Detectar formas incompatibles para piezas fundidas, forjadas o sinterizadas y proponer las correcciones pertinentes; Facilitar la mecanización disminuyendo al mínimo el número de estacadas; Prever puntos de sujeción para las piezas).

Estudiar y mejorar las secuencias de montaje y prever las herramientas necesarias (por ejemplo: Prever chaflanes para la inserción de piezas; Disminuir las direcciones de montaje; Incorporar elementos de referenciación).

Evitar problemas derivados de operaciones incompatibles (por ejemplo, la realización de soldaduras después de la pintura).

Repasar que el proyecto sea completo

El diseño de detalle tiene que proporcionar los documentos necesarios para la fabricación y, por lo tanto, no debe olvidar ningún elemento ni aspecto: las tapas, los conectores, la lubricación, la pintura, las indicaciones sobre la máquina; o los manuales de instalación, uso y mantenimiento.