



Universitat de Girona

CONTRIBUCIÓN METODOLÓGICA EN TÉCNICAS DE DISEÑAR PARA FABRICACIÓN

Inés FERRER REAL

ISBN: 978-84-690-7715-3
Dipòsit legal: GI-715-2007



Universitat de Girona

**Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería de Producto y
Proceso**

Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial

**Contribución metodológica en técnicas
de diseñar para fabricación**

TESIS DOCTORAL

Doctoranda: Inés Ferrer Real

Director: Dr. José Ríos Chueco

Director: Dr. Quim de Ciurana Gay

Girona, Marzo de 2007

A mis seres queridos

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer esta tesis a los dos directores que han hecho posible la realización de la misma, a José Ríos Chueco y a Quim de Ciurana Gay.

A José Ríos quiero agradecerle que me haya enseñado y guiado durante el complejo camino de la investigación. Le agradezco que me permitiera realizar una estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Madrid y todo lo que ello implicó. Así como también, la gran ayuda que me ofreció para obtener la estancia de investigación en la Universidad de Cambridge y el apoyo incondicional durante la misma. Le agradezco de forma especial la sinceridad, la claridad y los consejos en todos los aspectos, tanto en los relacionados con la tesis como en otros asuntos. Además de todo el tiempo y el esfuerzo que ha dedicado en este trabajo.

A Quim de Ciurana quiero agradecerle la confianza que ha mostrado en mí durante todos estos años, pues su gran esfuerzo por mantener mi posición en la Universidad ha hecho posible la realización de este trabajo. Le agradezco de forma muy especial la paciencia, el respeto, la ayuda y el ánimo que siempre me ha ofrecido durante el desarrollo del mismo, así como también que me haya facilitado todo lo que siempre he necesitado para poder desarrollar esta investigación.

Quiero agradecer a Huhg Shercliff de la Universidad de Cambridge que me permitiera realizar una estancia de investigación en dicha universidad, por haberme dedicado su tiempo, y por haberme facilitado el acceso a todo tipo de información y de recursos. A Fabricio Cochi del Centro Ricerche Fiat (C.R.Fiat) por la información que me proporcionó sobre la biela para la realización del caso práctico. A Pere Maimí y a Narcís Gascons por compartir su experiencia y conocimiento en mecanismos y máquinas durante el desarrollo del caso práctico. A Robert Blanch y a Marité Guerrieri por su colaboración en el prototipo de modelo de información, y a Raúl Morales por su asistencia en los últimos detalles de la tesis.

A mi amiga y compañera M^a Luisa le agradezco su amistad, su comprensión, sus consejos y la ayuda que siempre me ha ofrecido en todos los sentidos. Pues trabajar a su lado hace las cosas mucho más fáciles. A mis compañeros de despacho, Catalina Perez, Robert Blanch y Guillem Quintana les agradezco que me hayan proporcionado el entorno que realmente ha sido necesario para el desarrollo de esta tesis. De forma especial agradezco a Catalina que siempre haya escuchado mis quejas. A mis compañeros del grupo de investigación GREPP, concretamente Martí Casadesús, Rudi de Castro y Gerusa Giménez les agradezco su ayuda y su consideración en todos los aspectos docentes. A Jaume Valls le agradezco los ánimos y la ayuda que siempre me ha brindado, y el haberme facilitado las estancias de investigación.

A l'Esteve quiero agradecerle su confianza en mí como persona y su paciencia constante para esperar siempre "el año que viene". A mi familia les agradezco ser quien soy, y que siempre estén a mi lado, en los buenos y en los malos momentos.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Descripción del dominio de aplicación de la tesis	1
1.1.1. Información necesaria de los procesos de fabricación para DFM.....	3
1.2. Motivación de la tesis	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Plan de desarrollo	7
1.5. Medios utilizados.....	8
1.6. Contenido de la tesis.....	8
Capítulo 2. Estado del arte	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Proceso de diseño de producto.....	12
2.2.1. Metodologías del proceso de diseño	13
2.2.1.1. Los modelos de fases	14
2.2.1.2. La teoría de Diseño Axiomático.....	28
2.2.1.3. La técnica del Despliegue de la Función de Calidad.....	32
2.2.2. Definición y formalización de la información en el proceso de diseño.....	34
2.2.2.1. Definición y formalización de la información en diseño conceptual.....	36
2.2.3. Discusión	40
2.3. Integración del proceso de fabricación en el diseño de producto	42
2.3.1. Selección de los procesos de fabricación.....	44
2.3.1.1. Categorías en la selección de procesos.....	46
2.3.1.2. Estrategias en la selección de procesos	49
2.3.1.3. Estrategia de búsqueda libre	52
2.3.1.4. Herramientas para la selección de procesos de fabricación.....	64
2.3.2. Diseño para fabricar.....	66
2.3.2.1. Recomendaciones de diseñar para fabricar	67

2.3.2.2.	Métodos de análisis de fabricabilidad.....	68
2.3.3.	Discusión.....	70
2.4.	Establecimiento del problema	72
Capítulo 3.	Desarrollo de la propuesta	75
3.1.	Introducción	75
3.2.	Glosario de términos.....	76
3.3.	Consideraciones previas.....	77
3.4.	Descripción de la metodología	80
3.4.1.	Introducción	80
3.4.2.	Desarrollo de la metodología	82
3.4.2.1.	Fase I: Definición de la información de diseño	82
Dominio funcional	82	
Etapa I: Definir y formalizar los requerimientos funcionales (FRs).....	82	
Dominio físico.....	88	
Etapa II: Identificar los parámetros de diseño (DPs).....	88	
Etapa III: Definir y formalizar los parámetros de diseño (DPs).....	89	
3.4.2.2.	Fase II: Definición de la información de los procesos de fabricación... 92	
Dominio proceso	92	
Etapa IV: Elegir el proceso de fabricación.	92	
Etapa V: Identificar las propiedades de proceso (PPs) para cada parámetro de diseño (DPs).....	93	
Etapa VI: Definir y formalizar las propiedades de proceso (PPs)	97	
Etapa VII: Definir y formalizar los defectos de fabricación	101	
3.4.3.	Resumen de la metodología	102
3.5.	Prototipo de modelo de información.....	104
3.5.1.	Conceptos utilizados de UML	104
3.5.2.	Modelo de información propuesto	107
Capítulo 4.	Aplicación de la metodología propuesta	117
4.1.	Introducción	117
4.2.	Biela de un motor de combustión interna	120

4.2.1.	Tipos de bielas.....	120
4.2.2.	Análisis dinámico de la biela.....	121
4.2.3.	Formas, materiales y procesos de fabricación de las bielas simples.....	126
4.2.3.1.	Forma de la biela.....	126
4.2.3.2.	Materiales de la biela.....	127
4.2.3.3.	Procesos de fabricación de la biela	127
4.3.	Aplicación de la metodología: la biela.....	137
4.3.1.	Consideraciones previas	138
4.3.2.	Funciones y restricciones de la biela	139
4.3.3.	Resultados de la aplicación de la metodología a la biela	142
4.3.3.1.	Fase I: Definición de la información de diseño.....	142
	Dominio funcional.....	142
	Etapa I: Definir y formalizar los requerimientos funcionales (FRs)	142
	Dominio físico	156
	Etapa II: Identificar los parámetros de diseño (DPs).....	156
	Etapa III: Definir y formalizar los parámetros de diseño (DPs)	166
4.3.3.2.	Fase II: Definición de la información de los procesos de fabricación .	169
	Dominio proceso.....	170
	Etapa IV: Elegir el proceso de fabricación.....	170
	Etapa V: Identificar las propiedades de proceso (PPs)	170
	Etapa VI: Definir y formalizar las propiedades de proceso (PPs).....	171
	Etapa VII: Definir y formalizar los defectos de fabricación	184
4.3.3.3.	Resumen de aplicación de la metodología.....	185
4.3.4.	Aplicación de los resultados	187
4.3.5.	Comparación de la aproximación propuesta con la aplicación CES Selector	189
	Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros	191
5.1.	Conclusiones	191
5.2.	Contribuciones de la tesis	194
5.3.	Desarrollos futuros	195

Capítulo 6. Bibliografía.....197**ANEXOS**

Anexo 1: Documentos de la formalización de la información de la metodología

Anexo 2: Prototipo del modelo de información

Anexo 3: Plano de una biela de MCIA

Lista de acrónimos

FRs	Requerimientos funcionales
DPs	Parámetros de diseño
PVs	Variables de proceso
PPs	Propiedades del proceso de fabricación
Dfs	Defectos de fabricación
EVs	Variables de ejecución del proceso
MCIA	Motor de combustión interna alternativo
DFM	Diseñar para fabricar
QFD	Despliegue de la Función de Calidad
H/F	Proceso de fabricación de forja en matriz cerrada
P/M	Proceso de fabricación de compactación y sinterizado de polvo de metal
P/F	Proceso de fabricación de forja de polvo de metal.

Los acrónimos y símbolos que se definen y se usan sólo localmente en el texto principal no se mencionan en esta lista.

Capítulo 1. Introducción

El presente capítulo se ha realizado para exponer el dominio de aplicación en el que se encuadra esta tesis doctoral. Se expone además una descripción general que justifica la realización del trabajo, los objetivos que se han alcanzado, el procedimiento realizado y los medios que se han utilizado para su desarrollo.

1.1. Descripción del dominio de aplicación de la tesis

Las raíces de la integración del proceso de fabricación en el diseño de producto se remontan a antes de la segunda Guerra Mundial. La escasez de recursos disponibles, junto con la presión social y política para acortar el tiempo de desarrollo de las armas, fueron los principales motivos para activar la integración de la ingeniería de diseño y de fabricación (Gupta et al., 1995).

No obstante, esta integración fue interrumpida después de la guerra. Pues el empuje por prosperar y el rápido crecimiento industrial dieron lugar a que las actividades de diseño y de fabricación fueran desagregadas en diferentes departamentos. Esta separación condujo a un procedimiento de desarrollo de producto secuencial, también conocido como Ingeniería Secuencial.

A finales de los años 70, el incremento de la competencia global, la creciente complejidad de los diseños, la diversidad de los procesos de fabricación, y el deseo de reducir los tiempos y los costes en el desarrollo de los productos impulsaron el resurgimiento de esta integración entre diseño y fabricación (Gupta et al., 1995). Desde entonces, está ampliamente asumido que considerar el proceso de fabricación paralelamente al proceso de diseño permite obtener diseños más eficientes desde el punto de vista de coste, calidad y tiempo de desarrollo (Ullman, 1992; Vila, 2000; Riba, 2002).

Esta integración no tardó en expandirse a las demás fases del ciclo de vida del producto, originando durante los años 80, una nueva filosofía en el desarrollo de productos denominada Ingeniería Concurrente (Ullman, 1992; Riba, 2002). Los beneficios demostrados con la aplicación de esta nueva filosofía han convertido a la Ingeniería Concurrente en un fundamento básico para el desarrollo de productos.

En la integración de la ingeniería de diseño y la ingeniería de fabricación para las fases iniciales del diseño se destacan dos campos de investigación (Gupta et al., 1995; Kuo et al., 2001; Herrman et al., 2004): la selección de los procesos de fabricación y las técnicas de diseñar para fabricar (*Design for Manufacturing, DFM*). La selección de los procesos de fabricación tiene la finalidad de determinar o elegir aquellos procesos que son técnicamente y económicamente viables para un diseño dado (Ishii et al., 1991; Giachetti, 1997; Esawi y Asbhy, 1998; Lovatt y Shercliff, 1998a; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004). Mientras que las técnicas de diseñar para fabricar (DFM) tienen como trasfondo principal asegurar que el diseño es fabricable para un determinado proceso, así como también explicitar los beneficios, técnicos y económicos, que dicho proceso puede proporcionar (Bralla, 1999; Boothroyd et al., 2002)

En la integración de la ingeniería de diseño y la ingeniería de fabricación para las fases detalladas de diseño, las investigaciones se han centrado principalmente en el desarrollo de sistemas integrados en los sistemas CAD (*Computer Aided Design*), como los sistemas CAPP (*Computer Aided Process Planning*) (Ciurana et al., 2006; Ciurana et al., aceptado 10/2007) y los sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Estos sistemas, CAPP y CAM, permiten planificar el proceso durante las fases finales del diseño. Lo cual refleja que estos sistemas han tendido más hacia la planificación del proceso que hacia el diseño del producto. Por lo tanto están más en el campo de investigación de la planificación del proceso, que del diseño en sí (Gonzalez, 2001).

Aunque las investigaciones desarrolladas en este dominio de aplicación son fundamentales para facilitar la consideración del proceso de fabricación en el diseño, actualmente la experiencia del diseñador continua siendo fundamental para conseguirlo. Los principales motivos se pueden resumir en:

- La amplia diversidad de procesos existentes. Incluyendo procesos tradicionales que pueden haber quedado obsoletos, otros que son mejorados y otros que están siendo desarrollados.
- La amplia diversidad de información asociada a cada uno de ellos.
- La escasez de procedimientos sistemáticos para capturar, organizar y representar la información de los procesos que es relevante para el diseño (Swift, 2003; Ferrer et al., 2006a).
- La fuerte dependencia de esta información de los procesos con información empírica que proviene de años de experiencia.
- La complejidad del proceso de diseño.

En un entorno de diseñar para fabricar (DFM), la integración es posible cuando el diseñador tiene experiencia en el proceso o cuando la información de los procesos esta disponible para DFM. De forma general, se puede considerar que las fuentes básicas para obtener este tipo de información incluyen: los expertos del sector industrial, el conjunto de literatura especializada en procesos de fabricación y las publicaciones de autores de referencia en el ámbito de la integración de diseño y proceso

- El conocimiento de los expertos del sector industrial está limitado a los procesos de fabricación con los cuales trabajan habitualmente, y además, la colaboración entre la realidad de fabricación y la investigación en este caso es baja.
- La literatura especializada en procesos de fabricación representa una fuente muy importante de información para DFM (Committee under ASM direction, 1997; Committee under ASM direction, 1998; Bralla, 1999; Groover, 2002; Kalpakjian, 2003). No obstante, se detectan ciertos grados de desequilibrio y de ambigüedad en la misma (Swift, 2003). El desequilibrio radica en que no todos los procesos se tratan desde la misma perspectiva y con el mismo nivel de detalle, y la ambigüedad se debe a que la información, en ocasiones, está expuesta de forma compleja y en ocasiones incompleta. Como consecuencia la experiencia del diseñador se convierte en un punto clave para entenderla y para tomar decisiones en considerar la información necesaria para DFM (Swift, 2003).
- Las publicaciones de autores de referencia en el ámbito de la integración de diseño y fabricación (Lovatt, 1998; Shercliff y Lovatt, 2001; Boothroyd et al., 2002; Swift, 2003; Ashby et al., 2004) son una fuente importante para obtener la información de fabricación en relación al diseño de forma explícita, pues documentan claramente la relación entre la información de diseño y la información de los procesos de fabricación. Sin embargo, para DFM se precisa de completar esta información con información más específica de cada proceso de fabricación.

Atendiendo a la experiencia requerida para considerar la información de los procesos para DFM y la complejidad asociada al propio proceso de diseño, parece que resultaría muy apropiado que el diseñador pudiera tener disponible aquella información de los procesos que es realmente necesaria para DFM. Esto significa que sería realmente útil para el diseñador disponer de un sistema que le fuera proporcionando la información necesaria de los procesos en función de la información disponible en diseño (Ferrer et al., 2006a).

1.1.1. Información necesaria de los procesos de fabricación para DFM

En un procedimiento de diseño habitual, en el cual el objetivo es satisfacer la funcionalidad del producto (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Dieter, 2000; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001), la información de los procesos que es realmente necesaria es aquella puede afectar a las soluciones de diseño que se definen para satisfacer las funciones del producto (Suh, 2001).

Analizando esta situación desde el punto de vista de los procesos de fabricación (hacia atrás), se puede observar en la Figura 1-1 que para capturar la información de los procesos que es realmente necesaria, y que por ello debería estar disponible en diseño, se necesita

disponer de las soluciones de diseño, y que para disponer de las soluciones de diseño se necesita conocer las funciones que un determinado producto tiene que satisfacer.

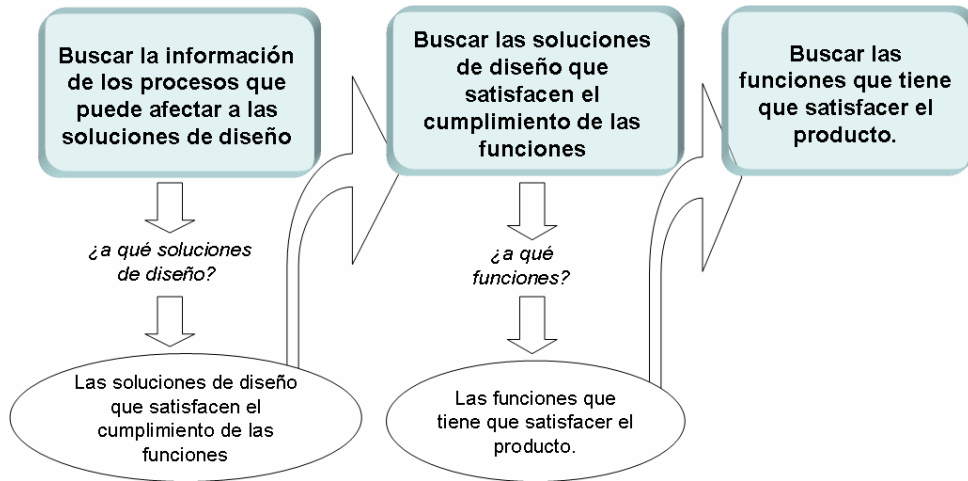


Figura 1-1: Análisis del procedimiento para capturar la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM

Invirtiendo el análisis de la Figura 1-1, es decir analizando esta situación desde un punto de vista clásico de diseño (hacia delante), se pueden extraer los elementos básicos y la secuencia lógica que se debería seguir para capturar la información necesaria de los procesos que debería estar disponible para DFM, Figura 1-2.

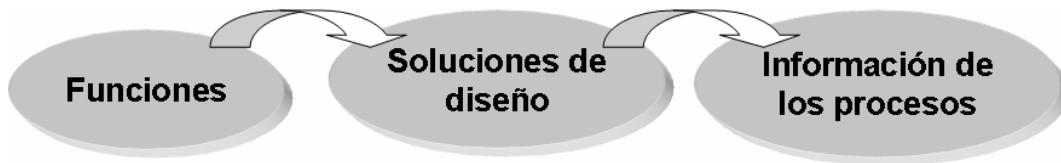


Figura 1-2: Elementos básicos para capturar la información de los procesos de fabricación para DFM

Estos elementos básicos incluyen: funciones, soluciones de diseño, información de los procesos, la relación de las funciones con las soluciones de diseño, y la relación de las soluciones de diseño con la información de los procesos.

Este breve análisis refleja un vínculo que está ampliamente establecido en la literatura; que la información de diseño es fundamental para determinar la información necesaria para DFM.

Considerando que el proceso de diseño es el punto de partida para la integración de diseño y fabricación, la información disponible de diseño se convierte en un pilar clave para la evolución de este campo de investigación. En cambio, la práctica habitual por parte del diseñador de no documentar de forma explícita toda la información de diseño (Chakrabarti et al., 2004) dificulta conocer cuál es la información de proceso que es relevante en cada fase de diseño, y por consiguiente establecer la conexión entre el proceso de diseño y los procesos de fabricación. En general, se acostumbra a definir los diseños finales a través de modelos de representación geométrica (modelos 3D y planos), pero la información relativa a la toma de decisiones no suele estar tan documentada, como pueden ser los requerimientos funcionales o las soluciones iniciales que los satisfacen.

Este campo de investigación relacionado con la definición y formalización de la información de las fases de diseño resulta de interés para un elevado grupo de investigadores: (Alexander y Stevens, 2002; Deng, 2002; Chakrabarti et al., 2004; Perez et al., 2005; Hunter et al., 2006; Rios et al., 2006; Takeda, et al, 3w). Su relevancia queda demostrada por los recientes trabajos que se han desarrollado en los últimos tiempos.

En resumen, el ámbito general en el que se encuadra la tesis es en las técnicas de diseñar para fabricar (DFM), concretamente, en el desarrollo de procedimientos sistemáticos que ayuden a capturar, definir y formalizar la información de los procesos que es realmente necesaria para DFM.

1.2. Motivación de la tesis

La situación que se ha planteado abarca una amplia variedad de campos de investigación, que se han expuesto y discutido en el capítulo 2 de la tesis. No obstante, se resumen de forma muy concreta los aspectos más relevantes de la situación actual en la captura, definición y formalización de la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM.

- El uso y la definición de información de diseño de forma implícita durante las fases iniciales del proceso de diseño ha resultado una barrera para la integración de la ingeniería de diseño y fabricación.
- Identificar, definir y formalizar la información del proceso que tiene relación con el diseño es un proceso costoso y complejo, que requiere de conocimiento y experiencia.
- Según Swift (Swift, 2003), se puede afirmar que los procedimientos sistemáticos que asisten en el desarrollo de las recomendaciones de diseño (también conocidas como guías de DFM) son tan complejos que no se aplican. Consecuentemente, cada empresa o usuario utiliza sus propios métodos para obtener la información de fabricación que es relevante considerar durante el proceso de diseño.

Considerando que los diseños son cada vez más complejos y que el grado de competitividad, desde el punto de vista de coste, tiempo de desarrollo y calidad de los productos, es cada vez más elevado, se pone en evidencia que la necesidad de integrar el diseño y la fabricación, así como con el resto de fases del ciclo de vida del producto,

adquiera cada vez mayor relevancia (Otto y Wood, 2001; Ashby et al., 2004; Herrman et al., 2004)

Como se ha venido demostrando a lo largo de los años, desde el punto de vista teórico, esta integración no está resultando nada fácil. En primer lugar por la propia complejidad del proceso de diseño, en segundo lugar por la amplia diversidad de procesos de fabricación y la variedad de información asociada a cada uno de ellos, y por último, por la relativamente baja integración de ambos campos de investigación, que en general puede deberse a que exista un reducido número de equipos multidisciplinares de investigación interesados en ambas áreas.

Actualmente, la decisión y la experiencia del diseñador continúan siendo los aspectos claves para garantizar el éxito de esta integración. A pesar que los trabajos que se han realizado hasta el momento pueden ayudar en ciertos aspectos de esta integración, todavía hay temas en los que profundizar.

Cuando el diseñador es experto tiene en consideración las limitaciones, las posibilidades y el coste asociado del proceso, aunque a menudo esta acción se produzca de forma inconsciente. El problema surge cuando el diseñador es inexperto o cuando no está disponible suficiente información y conocimiento sobre el proceso de fabricación. La consecuencia de esta situación es que algunas de las soluciones de diseño adoptadas pueden no ser adecuadas para la fabricación, comprometiendo así al proceso de fabricación o induciendo a rediseños posteriores que pueden afectar en el coste, el tiempo de desarrollo y la calidad de dicho producto.

La motivación principal de esta tesis es el desarrollo de un procedimiento sistemático para capturar y formalizar la información de los procesos de fabricación que debería estar disponible en el diseño para DFM.

1.3. Objetivos

Con el objetivo final de ayudar a solucionar la problemática planteada, esta tesis se propone dos objetivos:

1. Definir una metodología para capturar, definir, formalizar y documentar la información de los procesos de fabricación que debería estar disponible en el diseño para diseñar para fabricar (DFM) en el diseño de componentes.
2. Definir un prototipo de modelo de información que permitiría desarrollar una herramienta para asistir al diseñador en la captura y formalización de la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM, en el diseño de componentes

Para alcanzar estos propósitos, y como consecuencia de los problemas planteados en el apartado anterior, los objetivos parciales que se plantean alcanzar en este trabajo son los siguientes:

- Desarrollar un procedimiento sistemático que ayude a:

- Definir y formalizar de forma explícita la información relevante disponible de diseño, desde las fases iniciales del mismo.
 - Definir y formalizar de forma explícita la información relevante de los procesos de fabricación que puede afectar para obtener la información disponible de diseño.
 - Hacer explícitas las relaciones relevantes entre la información de diseño y la información de procesos. Por lo tanto que ayude a determinar la información del proceso que tiene relación con el diseño, pero aquella que es realmente necesaria.
- Probar y aplicar la metodología a un caso real.
 - Realizar un prototipo de modelo de información que pudiera servir como base para un futuro desarrollo informático.

1.4. Plan de desarrollo

El procedimiento que se ha seguido para el desarrollo de la tesis se especifica a continuación:

1. Análisis
 - Análisis del dominio de aplicación de la tesis. Integración de diseño y de fabricación.
 - Análisis del proceso de diseño: metodologías, flujo de información, y definición y formalización de la misma.
 - Análisis del proceso de fabricación en relación con el proceso de diseño: técnicas de DFM y la selección de los procesos de fabricación.
 - Análisis de un software para la selección de materiales y procesos de fabricación en fases iniciales del diseño; CES Selector 4.5 (Esawi y Asbhy, 2000).
2. Desarrollo de la metodología para el diseño de componentes
 - Definir y formalizar la información disponible de diseño (requerimientos funcionales y parámetros de diseño)
 - Definir un procedimiento para identificar la información de los procesos de fabricación en función de la información de diseño disponible.
 - Definir y formalizar la información de los procesos para DFM, la cual incluye las propiedades de los procesos y los defectos de fabricación.
3. Aplicación de la metodología a un caso real
 - Capturar y analizar la información necesaria relacionada con el caso
 - Aplicar la metodología y validarla
 - Valorar los resultados obtenidos de aplicar la metodología a un caso real.

4. Desarrollo del prototipo de modelo de información

- Analizar el lenguaje de modelado de información: Lenguaje de Modelado Unificado (UML)
- Definir la estructura y la información del modelo.

1.5. Medios utilizados

Los medios que se han utilizado durante el plan de desarrollo de la tesis son los siguientes:

- Documentación sobre diseño, procesos de fabricación y la integración entre ambos
- Software CES Selector V4.5
- Lenguaje de Modelado Unificado (UML)
- Consultas a expertos de diseño y expertos de fabricación relacionados con el caso de validación de la metodología.

1.6. Contenido de la tesis

La redacción de la tesis se ha estructurado en 5 capítulos, cuyo contenido se comenta a continuación de forma breve.

Capítulo 1 INTRODUCCION

Este capítulo contiene una descripción general que justifica la realización de esta tesis, los objetivos que se han pretendido alcanzar, el procedimiento de realización y los medios que se han utilizado para su desarrollo

Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se ha expuesto la revisión literaria de los principales campos de investigación que afectan al dominio de aplicación de este trabajo: el proceso de diseño y la integración del proceso de fabricación en el diseño de producto.

Relacionado con el proceso de diseño se han presentado las diferentes metodologías de diseño existentes enfatizando en los diferentes modelos desarrollados, en las actividades del proceso de diseño, en el flujo de información y en la relación de estas metodologías con el proceso de fabricación. También se ha estudiado la definición y formalización de la información del proceso de diseño.

Respeto a la integración del proceso de fabricación en el diseño de producto se han analizado los dos campos de investigación de esta integración para las fases iniciales de diseño: la selección de los procesos de fabricación y las técnicas para DFM.

Al final de cada una de estas partes nombradas se plantea una discusión para

resaltar los puntos fundamentales para el desarrollo de esta tesis

Capítulo 3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En este capítulo se expone la metodología desarrollada para alcanzar el primer objetivo de este trabajo y el prototipo de modelo de información que permite alcanzar el segundo objetivo propuesto.

Para facilitar el seguimiento de la metodología, inicialmente se presenta un glosario de términos y las consideraciones previas para su desarrollo. Posteriormente se describe la metodología y cada una de las fases que la componen: la fase de la información de diseño y la fase de la información de los procesos de fabricación.

En relación con el prototipo de modelo de información, inicialmente se plantea la estructura del mismo, posteriormente se detallan cada uno de los submodelos de información que componen dicha estructura, y finalmente se expone el prototipo de modelo que integra toda la información

Capítulo 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA

Este capítulo muestra un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta al proceso de diseño de un componente real.

El componente utilizado ha sido una biela de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) de vehículos de automóvil, y los procesos de fabricación estudiados incluyen: la forja en caliente con matriz cerrada, el proceso de compactación y sinterizado de polvo de metal, y la forja de polvo de metal. Estos procesos se han extraído del análisis de fabricantes de este componente y tras realizar una selección de procesos de fabricación mediante el software de selección CES 4.5v Selector (Esawi y Asbhy, 2000).

Después de aplicar la metodología a este caso, se plantea un ejemplo de la utilización de los resultados obtenidos para proporcionar la información necesaria de DFM en el diseño de nuevos componentes.

Finalmente, se compara la aproximación propuesta con la herramienta de selección de procesos, CES 4.5v Selector (Esawi y Asbhy, 2000), con la que se ha trabajado durante el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En el último capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo y se sugieren líneas futuras de investigación para completarlo. Así mismo, se presentan los aspectos originales e innovadores de la tesis en relación con otros trabajos realizados en la integración de diseño y fabricación.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el dominio de aplicación en el que se ha desarrollado esta tesis. La integración de la ingeniería de diseño y de fabricación ha sido analizada desde dos puntos de vista: la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Fabricación. Desde ambas perspectivas, los objetivos principales que se ha pretendido alcanzar con el estado del arte han sido los siguientes:

- Analizar los trabajos realizados en este dominio de aplicación; metodologías y herramientas que se han desarrollado para la integración de diseño y fabricación.
- Analizar la disponibilidad de la información de diseño y de fabricación para facilitar esta integración.
- Analizar el momento del proceso de diseño en el que tiene que ser considerado el proceso de fabricación.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Diseño se ha analizado el proceso de diseño de producto. Este análisis se ha focalizado en: las metodologías del proceso de diseño, el flujo de información que debe definirse durante la evolución del mismo, y la definición y formalización de dicha información.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Fabricación se han analizado los dos campos de investigación que están relacionados con este dominio de aplicación: la selección de los procesos de fabricación y el diseño para fabricar.

2.2. Proceso de diseño de producto

Diseñar es el proceso de concebir una idea que satisfaga unas necesidades deseadas o unos objetivos declarados. Desde una perspectiva general, se puede definir que el diseño es una interacción entre “qué” se quiere conseguir y “cómo” quiere conseguirse (Suh, 2001).

El diseño ha sido definido y utilizado en una variedad de direcciones, dependiendo del contexto específico o del campo de interés (Suh, 2001). Por ejemplo, en la disciplina de la Ingeniería de Diseño, los ingenieros mecánicos utilizan el término diseño para referirse al diseño de producto; en la disciplina de la Ingeniería de Fabricación, los ingenieros de fabricación lo usan para referirse al diseño de nuevos procesos o plantas de fabricación; en la disciplina de Ingeniería de Sistemas, los informáticos lo usan para referirse a circuitos o hardware de computadoras, y en Arquitectura, los arquitectos se refieren al diseño de edificios.

La Ingeniería de Diseño es la disciplina que crea, transforma ideas y conceptos, en productos definidos que satisfagan los requerimientos del cliente; es la disciplina en la que se lleva a cabo el diseño de producto. En esta disciplina, el rol del ingeniero de diseño es el análisis, la síntesis, la evaluación y la documentación de la solución de diseño. El ingeniero trabaja concurrentemente con otros especialistas e integra todas las entradas para producir la documentación de la forma, el material y el proceso que constituirán totalmente el producto (Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001)

El diseño de producto es definido como una transformación de información desde una necesidad, requerimientos y restricciones hasta la descripción de una estructura que es capaz de satisfacer esas demandas (Hubka y Eder, 1996).

El proceso de diseño se considera una de las diferentes actividades que forman parte del desarrollo de un producto. Pues durante el desarrollo del mismo se incluye otras actividades que también son necesarias para traer un nuevo concepto desde que se detecta una necesidad, o desde que se propone una idea, hasta que es un producto listo para el mercado (Otto y Wood, 2001). Estas actividades comprenden: mercadotecnia, diseño, fabricación y montaje, venta, uso y mantenimiento, y eliminación o reciclado (Pahl et al., 1996; Vila, 2000), Figura 2-1.

El procedimiento para desarrollar un producto ha ido evolucionando con el objetivo de obtener productos más competitivos desde el punto de vista de costes, tiempo de desarrollo y calidad. Para ello, con los años se ha pasado de un desarrollo basado en Ingeniería Secuencial, en la que las diferentes actividades se desarrollaban de un modo encadenado, a un desarrollo basado en Ingeniería Concurrente, en la que las diferentes actividades se desarrollan en paralelo (Ullman, 1992; Vila, 2000). Por ejemplo, la propuesta de un modelo de referencia para el desarrollo de productos en el que se integra la fase de diseño, el proceso de fabricación y el desarrollo del proceso de producción (Aca et al., 2004).

En este entorno de Ingeniería Concurrente en el que se desarrollan actualmente los productos, el proceso de diseño es la actividad que se ha visto más afectada. Porque

actualmente, el resultado del diseño no sólo tiene la función de satisfacer las necesidades del cliente, sino que también tiene que satisfacer a aquellas que surgen de las distintas fases del ciclo de vida del producto.

El hecho de que el diseño sea la primera actividad en el desarrollo del producto, junto con la relevancia que ha tomado esta actividad en el entorno de Ingeniería Concurrente en el que se desarrollan actualmente, han inducido a que el proceso de diseño sea un campo de investigación ampliamente estudiado.

Considerando el dominio de aplicación de este trabajo, el proceso de diseño ha sido estudiado desde dos puntos de vista: las metodologías para llevar a cabo el proceso de diseño y los procedimientos sistemáticos para definir la información de diseño en las fases iniciales del mismo.

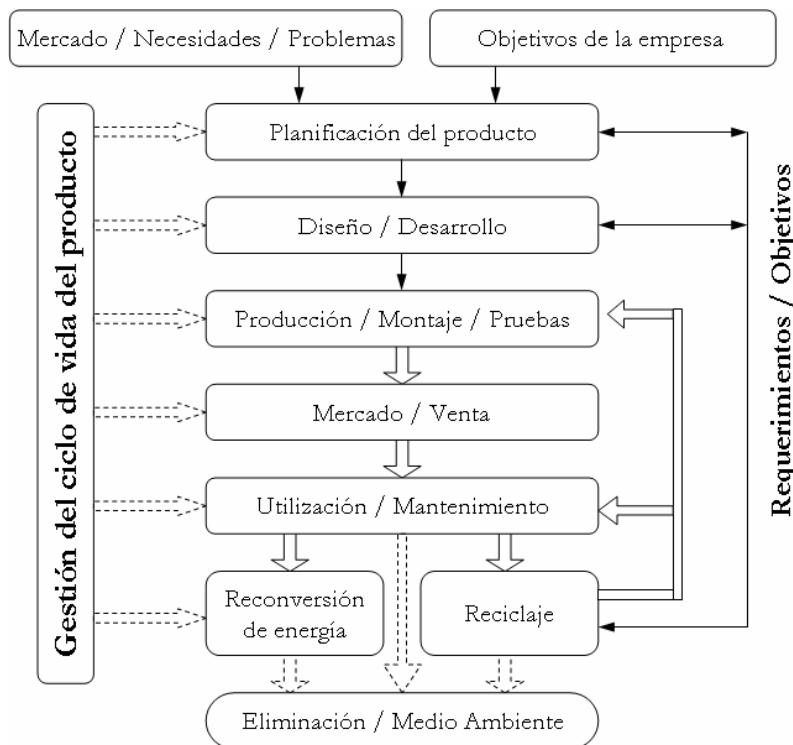


Figura 2-1: Ciclo de vida del producto (fuente de: (Pahl et al., 1996))

2.2.1. Metodologías del proceso de diseño

Desde los años 60, el proceso de diseño ha sido objetivo de estudio por muchos investigadores a nivel mundial (Pahl et al., 1996). Los primeros trabajos de investigación se centraron en el desarrollo de métodos que definían la estructura del proceso de diseño. Las diferentes investigaciones realizadas bajo este enfoque han dado lugar a diferentes modelos del proceso de diseño que se clasifican en dos grupos (Cross, 1994): modelos descriptivos y modelos prescriptivos.

- Los modelos descriptivos describen la secuencia de las actividades que típicamente ocurren en el diseño. Generalmente, estos modelos permiten buscar soluciones de diseño basándose en métodos no rigurosos, usando experiencias previas, guías generales (*guidelines*) y reglas de buenas prácticas (*thumb rules*). Todo ello induce a que el diseñador piense que lleva la dirección correcta, pero sin absoluta garantía de éxito (Cross, 1994). Estos modelos no proponen procedimientos sistemáticos que asistan al diseñador durante la evolución del diseño y que garantizan que las necesidades son traducidas hasta la fase final. Estos modelos definen el proceso de diseño desde un punto de vista heurístico (Cross, 1994). Se incluyen en este grupo el modelo propuesto por Nigel (1994) y el modelo de French (1985) (Cross, 1994).
- Los modelos prescriptivos intentan recetar un patrón más concreto de las actividades que hay que llevar a cabo para obtener el diseño final. La mayoría de los métodos prescriptivos han enfatizado en la necesidad de un trabajo más analítico para proceder a la generación de conceptos de soluciones. La intención de estos modelos es intentar asegurar que el problema real sea identificado, completamente entendido y que las soluciones definidas sean acertadas. Para ello, estos modelos ofrecen procedimientos sistemáticos para evolucionar el diseño (Cross, 1994). Dentro de este tipo de modelos, se distinguen dos tipos de modelos: los modelos de fases y los modelos de artefacto (Oosterman, 2001).
 - Los modelos de fases estructuran el proceso de diseño en etapas o fases, y definen las actividades principales que deben realizarse en cada etapa para llevar a cabo el diseño. Las actividades de análisis, síntesis y evaluación se incluyen de forma evidente en cada fase. Dentro de estos modelos se incluyen los modelos propuestos por (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Dieter, 2000; Otto y Wood, 2001).
 - Los modelos de artefacto también estructuran el proceso de diseño, pero se centran principalmente en cómo hay que evolucionar la información hasta obtener el diseño final. Dentro de estos modelos se incluyen la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 1990; Suh, 2001) y la técnica del Despliegue de la Función de Calidad (*Quality Function Deployment, QFD*) (Akao, 1990).

En este capítulo se describirá, de forma general, los modelos de fases, la teoría de Diseño Axiomático y la técnica del Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

2.2.1.1. Los modelos de fases

Los modelos de fases estructuran el proceso de diseño en etapas para facilitar el desarrollo y el entendimiento del mismo. Estos modelos especifican como se estructura el diseño para conseguir el diseño final y proporcionan una idea general de la información que hay que obtener en cada una de las fases; es decir el flujo de información (entradas y salidas de cada fase). Por ejemplo, según (Pahl et al., 1996), las fases y el flujo de información que debe obtenerse en cada una de ellas se expone en la Figura 2-2.

Como se refleja en la Figura 2-2, las fases se componen de actividades. Las actividades son el conjunto de tareas que hay que realizar a lo largo del proceso de diseño para alcanzar el

diseño final. En cada actividad se define la información necesaria para realizar la siguiente actividad, y el resultado del conjunto será la información que se debe obtener en cada fase (Pahl et al., 1996), Figura 2-2.

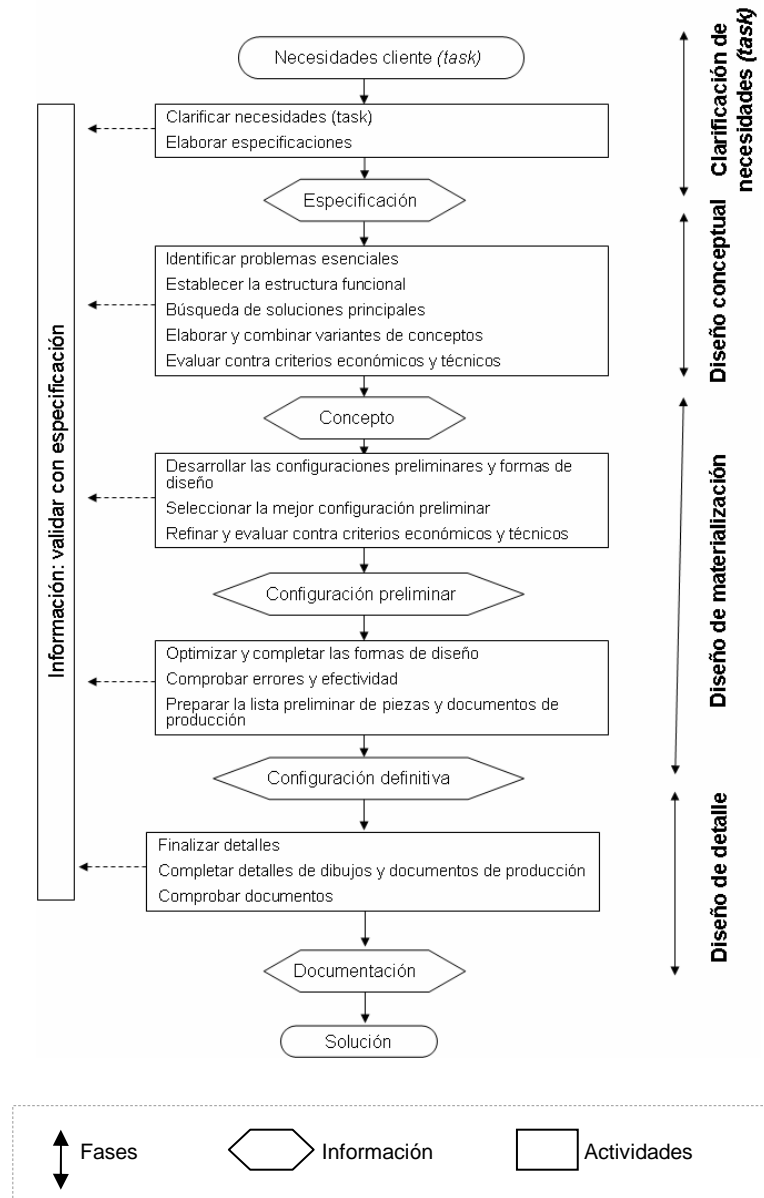


Figura 2-2. Estructura de diseño según Pahl & Beitz (fuente de: (Pahl et al., 1996))

a. Fases de los modelos de diseño

Desde el inicio de la descripción del proceso de diseño en modelo de fases, con el modelo de diseño Asimow (1962) y con el modelo de Roth (1965), se han desarrollado varias versiones de modelos de diseño (Pahl et al., 1996). Entre ellos, destacar los modelos

propuestos por (Pugh, 1990; Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Dieter, 2000). La Tabla 2-1 expone las diferentes fases que proponen cada uno de los modelos citados.

(Pahl et al., 1996)	(Dieter, 2000)	(Pugh, 1990)	(Ullman, 1992)	Analogía de fases (Farias et al., 2006)
Planificación y clarificación de la tarea	Definición del problema	Mercado	Establecimiento de la necesidad	Ideación
		Especificación	Desarrollo de especificaciones	
Diseño conceptual	Diseño conceptual	Diseño del concepto	Desarrollo de Conceptos	Desarrollo Conceptual
Diseño de Materialización	Diseño de forma	Diseño detallado	Diseño del producto	Diseño de materialización
Diseño detallado	Diseño detallado			Diseño detallado
		Fabricación	Producción	Lanzamiento
		Ventas	Servicio	
			Retirada	

Tabla 2-1: Fases de los modelos clásicos para el diseño del producto

En todos los modelos, las fases pretenden delimitar las fronteras del diseño. Pero en ocasiones estas fronteras resultan difusas. Por ejemplo a veces puede ser necesario determinar algunas propiedades de material durante la fase de diseño conceptual, o aspectos detallados de fabricación durante el diseño de materialización (Pahl et al., 1996)

Desde el punto de vista de cómo se llevan a cabo las fases para evolucionar el diseño, los modelos citados proponen diferentes métodos de ejecución. Por ejemplo, el modelo de Pugh (Pugh, 1990) propone que las fases se ejecuten de forma secuencial, mientras los modelos de Pahl & Beitz (Pahl et al., 1996) y de Ullman (Ullman, 1992) proponen que las fases se ejecuten de forma secuencial pero realizando iteraciones entre ellas.

Considerando la aproximación sistemática de Pahl & Beitz (Pahl et al., 1996), junto con la analogía de fases propuesta por Farias (Farias et al., 2006) (Tabla 2-1), las fases del proceso de diseño se pueden agrupar en: ideación, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. La Tabla 2-2 muestra estas fases, junto con la información resultante de cada una de ellas.

Fase de diseño	Información resultante en las fases de diseño
Ideación	Necesidades de cliente o del mercado
Diseño conceptual	Concepto de producto
Diseño de materialización	Configuración de diseño
Diseño de detalle	Especificaciones de fabricación

Tabla 2-2: Relación entre las fases de diseño y la información de cada fase.

A continuación se expone una breve descripción de cada una de estas fases desde dos puntos de vista: el objetivo que se pretende alcanzar en cada fase y la información que debe obtenerse en cada una ellas.

Ideación

La fase de ideación es la etapa del diseño que tiene por objetivo identificar y definir el conjunto de necesidades que tiene que satisfacer el producto final. En esta fase se detecta la necesidad o surge la idea de tener que realizar un determinado diseño o proyecto (Pahl et al., 1996).

Los estímulos para el desarrollo de diseños o proyectos en una empresa pueden proceder desde el exterior o del interior de la misma (Pahl et al., 1996). De los estímulos procedentes del exterior, la vía más común es el mercado. En él se pueden detectar cambios en los requerimientos y las necesidades, nuevas tendencias o modas, sugerencias o reclamaciones de los clientes y el posicionamiento de los competidores. Aunque estos estímulos también pueden ser impulsados por cambios políticos o económicos de un país, por la existencia de nuevas tecnologías, o por criterios ambientales o de reciclaje. Desde el interior de la compañía, los estímulos para nuevos diseños, se pueden obtener de los propios miembros de la empresa, como investigadores o diseñadores, como consecuencia de la disponibilidad de nuevos métodos de producción o de la ampliación de mercados o de la diversificación de los productos disponibles en la misma.

No obstante, independientemente de la procedencia del estímulo, las necesidades deben ser identificadas, capturadas y documentadas para iniciar el proceso de diseño. Estas necesidades se conocen como las necesidades del cliente y se definen como el conjunto de necesidades por las cuales se desarrollan los proyectos y a las cuales tiene que satisfacer dicho proyecto (Alexander y Stevens, 2002)

Diseño conceptual

La fase de diseño conceptual es la etapa del diseño en la cual se establece la solución principal de diseño. Normalmente, esta solución se denomina el concepto de producto (Pahl et al., 1996). El concepto es un esquema que contiene las funciones principales y sus relaciones, junto con las definiciones físicas preliminares que materializan estas funciones y sus relaciones (Roozenburg, 1995; Pahl et al., 1996).

Partiendo de las necesidades de cliente obtenidas en la fase de ideación, la obtención de un concepto requiere de: analizar el problema, establecer la estructura funcional del producto, buscar las estructuras físicas adecuadas y combinarlas para obtener la estructura final que definirá el concepto (Pahl et al., 1996).

Tras este procedimiento se obtienen varios conceptos que satisfacen unas mismas necesidades, y por lo tanto hay que evaluarlos. Para la evaluación es necesario transformar las estructuras físicas en representaciones más concretas (Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001). Esta concretización implica definir la distribución preliminar, el dimensionamiento inicial, hacer una selección preliminar de materiales y considerar las posibilidades tecnológicas de fabricación de los componentes principales del diseño (Pahl et al., 1996). Solo así es posible asegurar que la elección de concepto cumple con los aspectos esenciales de una solución principal, y con los requerimientos y las restricciones establecidas en el diseño (Otto y Wood, 2001). Sin embargo, hay que remarcar que esta concretización es todavía bastante general en esta fase.

Diseño de materialización

En esta etapa se define la distribución del diseño, más conocido normalmente como la configuración de diseño (*layout*). La configuración de diseño representa la distribución global y definitiva del producto que permite obtener una visión general del montaje, componentes y piezas, así como también de las formas geométricas, dimensiones, materiales y proceso de fabricación de dichas piezas. El resultado final de esta fase es la configuración definitiva (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996).

Inicialmente, partiendo del concepto se plantean diferentes soluciones denominadas configuración preliminar. Durante la definición de cada configuración, la especificación de la forma, el material y el proceso de fabricación que satisfagan las funciones del producto, adquiere una especial relevancia en esta fase del diseño (Figura 2-3). Una de las razones radica en que estas especificaciones, de material, forma y proceso, son claves para la evaluación técnica y económica de cada una de las configuraciones preliminares, y la otra razón, es porque diseñar formas que sean producibles y que proporcionen la función deseada es el objetivo principal de esta etapa (Ullman, 1992).

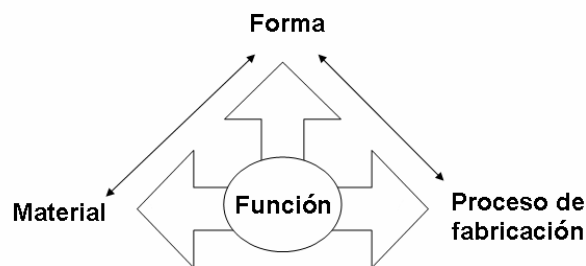


Figura 2-3: Elementos básicos del diseño de producto, según Ullman (Ullman, 1992)

La Figura 2-3 refleja las tres áreas de decisión de diseño que se tienen que definir para satisfacer las funciones del producto: material, forma y proceso. Así como también, la estrecha relación que existe entre ellas y con la función. Las decisiones de cada área no se pueden tomar de forma independiente, pues existe un acoplamiento entre las decisiones de material, forma y proceso de fabricación que se toman de un producto (Lovatt, 1998; Lenau, 2002; Gupta y Chen, 2003). Algunos ejemplos de estas dependencias son las siguientes (Lovatt, 1998):

- Las formas complejas, a veces son deseables para conseguir las características de diseño deseadas o para reducir al mínimo el número de piezas, pero normalmente tienden a ser más difíciles y costosas de fabricar.
- Los procesos no pueden procesar cualquier material, pues generalmente tienen limitaciones para procesar ciertos materiales. Además, también hay que tener en cuenta que dependiendo del proceso de fabricación utilizado, las propiedades del material y por lo tanto de la pieza resultante pueden estar afectadas.

La dependencia entre estas tres áreas de decisión queda constatada debido a que la definición de cualquiera de ellas, puede generar restricciones sobre la decisión de las otras dos. Por ello, aunque es importante definir las durante el diseño de producto, también es importante considerar las restricciones que pueden conllevar.

La solución óptima de diseño se obtiene si las decisiones de material, forma y proceso se realizan de un modo simultáneo. Consecuentemente, es necesaria una continua iteración entre las tres áreas de decisión (Lovatt, 1998). Esto da lugar a que las decisiones que se toman en esta fase, más que en la de diseño conceptual, se desarrollen en ciclos correctivos, en los que el análisis, la síntesis, la simulación y la evaluación se repiten constantemente y se complementan unos con otros.

La selección de una configuración preliminar, según criterios técnicos y económicos, permite finalmente obtener la configuración definitiva. La configuración definitiva se refina hasta que al final del diseño de materialización se obtiene un dibujo esquematizado, haciendo énfasis en las dimensiones, las formas más importantes y la lista preliminar de piezas.

Diseño de detalle

En esta fase del proceso de diseño se establece la disposición final, la forma, las dimensiones y las propiedades superficiales de cada una de las piezas individuales que compondrán el diseño. Además, se refinan los materiales definitivos, el proceso de fabricación, la estimación de costes y otros documentos de producción necesarios. Se especifican todos los detalles de cada una de las piezas que componen el producto final, obteniendo como resultado los planos de detalle, de montaje y lista detallada de componentes y piezas. El resultado final de la fase de diseño de detalle son las especificaciones de producción (Pahl et al., 1996)

b. Actividades y flujo de información en el proceso de diseño

Las actividades de diseño son el conjunto de tareas que hay que realizar a lo largo del proceso de diseño para obtener el diseño final. En general, todos los autores exponen las diferentes actividades de diseño de forma explícita, y establecen la relación de dichas actividades con las fases de sus modelos de diseño. Entre ellos, existen autores que exponen las actividades de forma más detallada, como (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996), y otros de forma más general, como (Dieter, 2000).

Las actividades de diseño intentan cubrir todos los aspectos del proceso de diseño (Cross, 1994), por consiguiente incluyen actividades como definir, generar, evaluar, decidir y comprobar la información correspondiente a cada actividad. Es decir, todas las actividades relacionadas con las labores de sintetizar, analizar y evaluar.

En la medida que se ejecutan las actividades, o conjunto de ellas, la información de diseño se va definiendo, evolucionando y transformando. Por lo tanto se detecta una evidencia clara del flujo de información cuando se analiza cualquiera de los modelos que se han citado en este trabajo.

Tras el análisis de la literatura, y considerando la amplitud de las actividades del proceso de diseño, este trabajo se centrará en aquellas actividades que son más relevantes desde el punto de vista de la información que hay que definir. Dichas actividades, junto con el flujo de información que se deriva de llevarlas a cabo, se exponen en la Tabla 2-3.

Fases de diseño	Actividades del proceso de diseño	Flujo de información en el proceso de diseño
Ideación	Identificar las necesidades de los clientes	Necesidades de cliente
Diseño conceptual	Análisis funcional	Estructura funcional (Funciones y sub-funciones)
	Determinar los requerimientos de producto	Requerimientos de producto
	Definir la arquitectura de producto	Estructura física (Módulos funcionales)
	Generación de concepto	Soluciones físicas Principios de trabajo Estructuras de trabajo
Diseño de materialización	Definición de la configuración	Módulos físicos Componentes
Diseño de detalle	Refinar detalles	Componentes auxiliares Propiedades detalladas de geometría, forma y material.

Tabla 2-3: Actividades principales en el proceso de diseño y flujo de información

A continuación se expone la descripción de cada una de estas actividades, enfatizando en la información que hay que definir en cada una de ellas. También se reflejará la conexión existente entre ellas, a pesar que el inicio de una actividad no implica el fin de la otra, pues el proceso de diseño es iterativo, evolutivo y cambiante, como ya se ha comentado anteriormente.

Identificar las necesidades del cliente

Tras haber detectado un indicio general de necesidad o idea, hay que analizar las diferentes áreas o entornos en los que un nuevo diseño puede ser relevante. De este modo se puede obtener de forma más amplia el conjunto de necesidades que el diseño tiene que satisfacer.

Las necesidades del cliente incluyen todos los requisitos que el cliente está buscando de un producto, proceso, sistema o material (Suh, 1990; Ullman, 1992; Suh, 2001). Estas necesidades comprenden desde los requisitos declarados directamente, hasta aquellos que están implícitos o latentes y que también deben ser considerados en el diseño (Otto y Wood, 2001). Las necesidades del cliente representan lo que quiere el cliente del producto, lo que espera de él (Suh, 1990; Ullman, 1992; Suh, 2001).

A menudo, las necesidades se limitan a las peticiones de los clientes, usuarios finales o necesidades del mercado. En cambio, este concepto tiene un campo de aplicación mucho más amplio (Alexander y Stevens, 2002). En general, está ampliamente asumido dentro del entorno de Ingeniería de Diseño, que las necesidades se deberían obtener de todos los miembros relacionados con el proyecto/producto (*stakeholders*), y para todos ellos se deberían satisfacer (Pahl et al., 1996; Alexander y Stevens, 2002)

Identificar las necesidades del cliente es una actividad importante, pues resulta el motor del diseño y sin ellas no existiría diseño. Reflejan qué hay que conseguir en el diseño final.

Análisis funcional

Cuando las necesidades del cliente ya han sido recopiladas hay que empezar a definir claramente los objetivos del diseño. Para ello un primer paso es desarrollar el análisis funcional del diseño (Ullman, 1992; Cross, 1994; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001). El análisis funcional consiste en descomponer funcionalmente el producto, independientemente de su estructura física (Ullman, 1992; Cross, 1994; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001).

La descomposición funcional se origina con Pahl (Pahl et al., 1996) y es adoptada por la mayoría de los modelos de diseño. La descomposición funcional disgrega la función principal en diferentes niveles de funciones que son requeridas para conseguir dicha función principal. Por lo tanto descomponer funcionalmente un producto significa identificar las funciones y subfunciones que tiene que satisfacer el producto.

Un ejemplo del análisis funcional de una biela de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) se expone en la Figura 2-4.

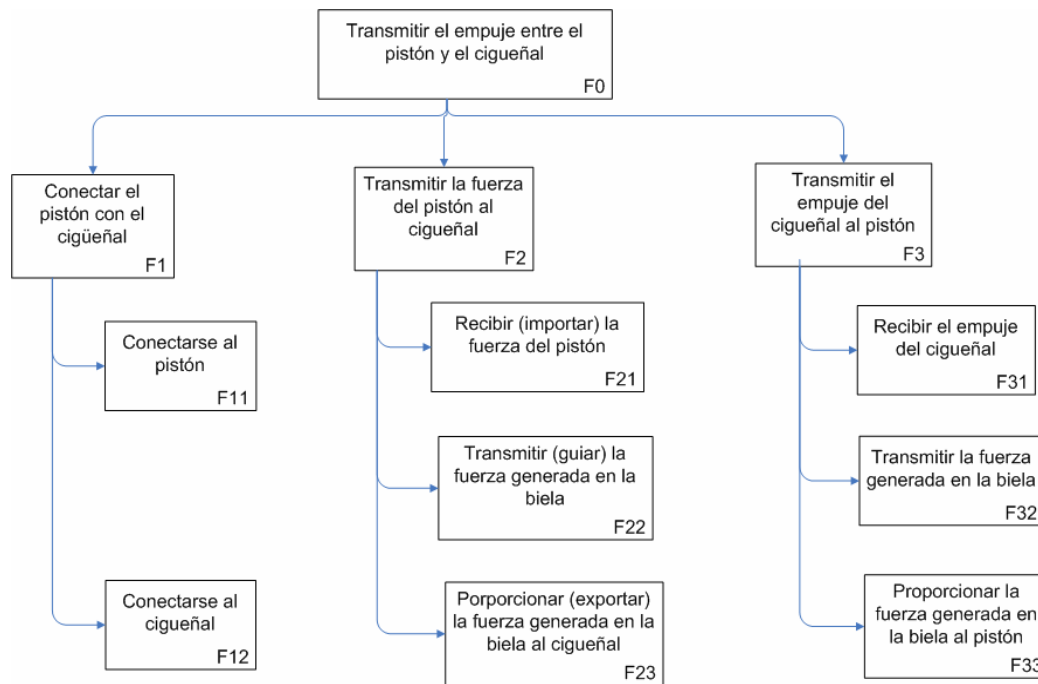


Figura 2-4: Jerarquía funcional de una biela de un motor de MCA de vehículos de automóvil.

Una función de un producto es una declaración clara y reproducible de la relación entre la entrada disponible y la salida deseada de dicho producto, independientemente de cualquier particular solución. La función de un producto representa qué tiene que hacer el producto (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001).

Las subfunciones son las funciones que se tienen que cumplir para poder conseguir la función principal. Estas subfunciones se relacionan entre ellas y su cumplimiento conjunto permitirá cumplir con la función principal.

El análisis funcional es importante por tres razones (Ullman, 1992). La primera porque permite entender mejor las expectativas que tiene el cliente sobre el comportamiento esperado del producto, así como también entender el problema antes del desarrollo del producto. La segunda, porque el resultado de la descomposición permite controlar mejor la búsqueda de soluciones para resolver el problema de diseño. Y la última, porque permite detectar posibles soluciones en función de problemas ya resueltos con anterioridad.

La importancia del análisis funcional está ampliamente declarada por todos los autores de diseño. Según (Otto y Wood, 2001): “El análisis funcional es aplicable a todos los productos, porque desde el punto de vista funcional todos los productos hacen alguna cosa, por lo tanto cumplen con alguna función”. El resultado final de este análisis es conocido como la estructura funcional del producto (Ullman, 1992; Cross, 1994; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001).

Determinar los requerimientos de producto

Cuando las necesidades de los clientes ya han sido detectadas y recopiladas, y se ha realizado el análisis funcional, se procede a la definición de los requerimientos.

La definición del término requerimiento está muy influenciada por el entorno de ingeniería del cual procede: de la Ingeniería de Diseño, de Sistemas o de Requerimientos (Rios et al., 2006)

Desde la Ingeniería de Diseño, el término requerimiento se define, según (Cross, 1994), como “una declaración que debe ser satisfecha y que debe ser expresada en términos cuantitativos; un requerimiento indica qué debe hacer el producto”. La definición propuesta por (Otto y Wood, 2001) es un poco más amplia en el sentido que declara: “los requerimientos son criterios cuantitativos y medibles que deben ser satisfechos por el producto diseñado. Los requerimientos deben ser medibles, deben poder ser comprobados o verificados en cualquier estado del proceso de desarrollo de diseño, y no sólo al final cuando el producto está diseñado y construido. Si un requerimiento no es cuantificable y comprobable, no es un requerimiento”

Es importante destacar que normalmente la actividad de definir los requerimientos va evolucionando desde el inicio del proceso de diseño, antes del análisis funcional, hasta el inicio de la definición física del mismo. Durante esta evolución, según Rios (Rios et al., 2006) se identifican tres niveles de requerimientos que dan lugar a tres documentos distintos, Figura 2-5: los requerimientos de usuario (*User Requirements Document, URDs*), los requerimientos de producto (*System Requirements Document, SRD*) y las especificaciones de diseño (*System Design Specification, SDS*)

- Los requerimientos de usuario (*user requirements, UDs*) se derivan de recopilar las necesidades de todos los miembros relacionados con el proyecto/producto (*stakeholders*).
- Los requerimientos de producto (*system requirements, SRs*) especifican el problema que se quiere resolver considerando aspectos del cliente y aspectos técnicos.
- Las especificaciones de diseño (*system design specification, SDSs*) representan las primeras declaraciones de la descripción de la solución física de diseño.

Dentro de cada uno de estos documentos se incluye una amplia variedad de requerimientos que llevan asociado un amplio campo de investigación (Chakrabarti et al., 2004; Perez et al., 2005; Rios et al., 2006).

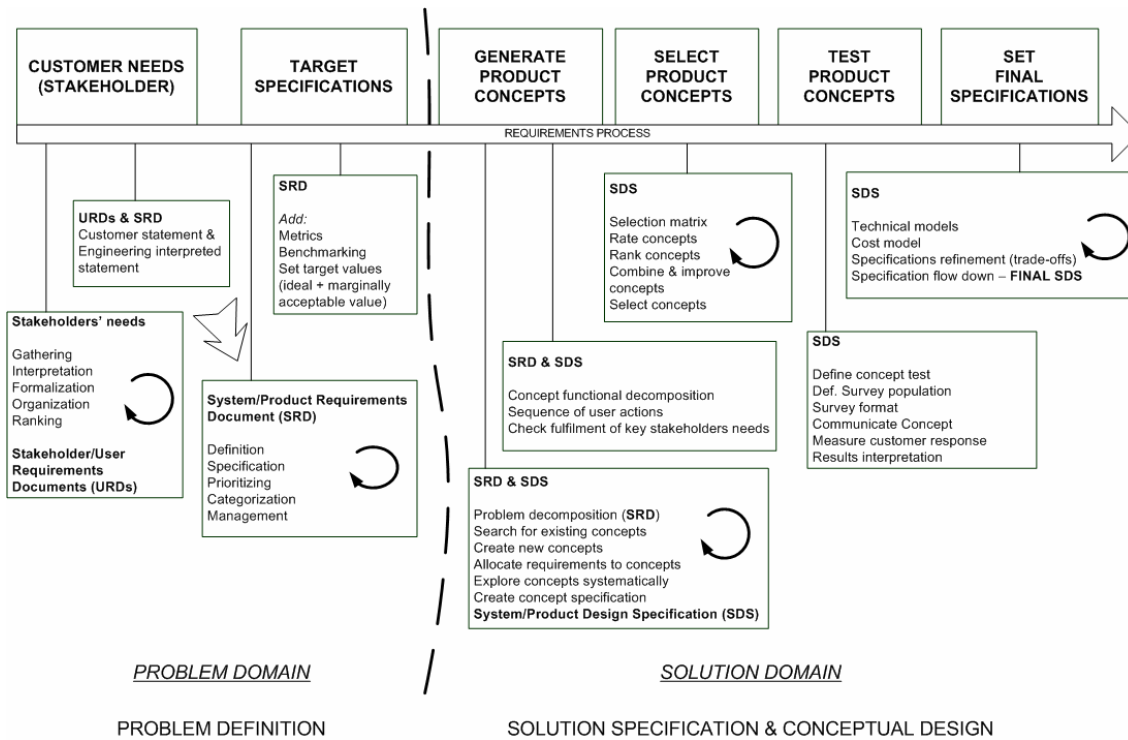


Figura 2-5: Relación entre requerimientos y diseño (fuente de: (Rios et al., 2006))

Esta tesis se ha limitado a dos tipos de requerimientos de producto: los requerimientos funcionales y las restricciones. Pero se asume que hasta obtener su definición final su evolución pasará los tres tipos de documentos comentados anteriormente.

- Un requerimiento funcional se considera como un tipo particular de requerimiento, y representa lo que el producto tiene que hacer independientemente de la solución de diseño adoptada (Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001). Considerando los principios básicos de la disciplina de Ingeniería de Requerimientos, Rios (Rios et al., 2006) define un requerimiento funcional como: “una declaración única y no ambigua de una única funcionalidad formulada en lenguaje natural, escrita de manera que pueda ser categorizada, trazada, medida, verificada y validada”. Los requerimientos funcionales describen el comportamiento del producto, obtenido de los objetivos especificados por el usuario. Es decir, de las funciones que debe satisfacer el producto.
- Una restricción es una declaración de limitación que actúa modificando un requerimiento o un conjunto de requerimientos mediante la limitación del rango de soluciones aceptables (Alexander y Stevens, 2002). Según (Rios et al., 2006) una restricción afecta a algún tipo de requerimiento o parámetro de diseño, y limita el rango de soluciones posibles. Según (Otto y Wood, 2001), una restricción es una declaración de un criterio claro que debe ser satisfecha por el producto y que requiere

de considerar el producto entero para determinar el cumplimiento de dicho criterio. Las restricciones deben ser satisfechas mediante las propiedades del producto entero.

Determinar y documentar los requerimientos del producto, en su sentido más genérico, es un punto clave para garantizar el éxito del diseño. Pues representan la interpretación de las necesidades del cliente desde un punto de vista cuantificable, medible y validable. Son el punto de partida del proceso de diseño. Como es ampliamente conocido en la literatura de diseño, una mala definición de los requerimientos de producto dará lugar a un producto no satisfactorio (Pahl et al., 1996; Suh, 2001; Alexander y Stevens, 2002; Rios et al., 2006)

Arquitectura de producto

La definición física del diseño es el paso inminente tras el análisis funcional y la definición de los requerimientos de producto. Varias son las tendencias sobre el procedimiento de definir físicamente el diseño, algunas de ellas defienden que primero se define el concepto y luego la arquitectura (Pahl et al., 1996; Dieter, 2000), mientras que otros autores consideran que la definición de la arquitectura debe iniciarse antes de definir el concepto; en el comienzo del diseño conceptual (Otto y Wood, 2001).

En el más sentido tradicional, la arquitectura se define como la disposición de los elementos físicos de un producto para llevar a cabo las funciones requeridas (Dieter, 2000). No obstante, desde un punto de vista más conceptual (Oosterman, 2001), (Pahl et al., 1996) y (Suh, 2001) concluyen que la arquitectura de un producto puede ser definida como el modo en que distintas estructuras físicas interactúan para cumplir con el correcto funcionamiento del producto. Es decir, la arquitectura describe las estructuras físicas que componen un diseño y como interactúan (Oosterman, 2001).

La estructura física representa la materialización de los módulos funcionales del producto. Los módulos funcionales son un conjunto de funciones que están relacionadas (Van Wie, Mike J. et al., 2003) y que pueden agruparse para ser satisfechas con un sola estructura física.

Un ejemplo de las estructuras físicas que materializan los módulos funcionales de una biela de un MCIA se muestran en la Figura 2-6. .

Las estructuras físicas se convertirán en bloques de construcción física; también conocidos como subsistemas, sub-montajes o módulos. Cada estructura física se implementará con un conjunto de componentes, y con propiedades de material y de forma que llevarán a cabo las funciones

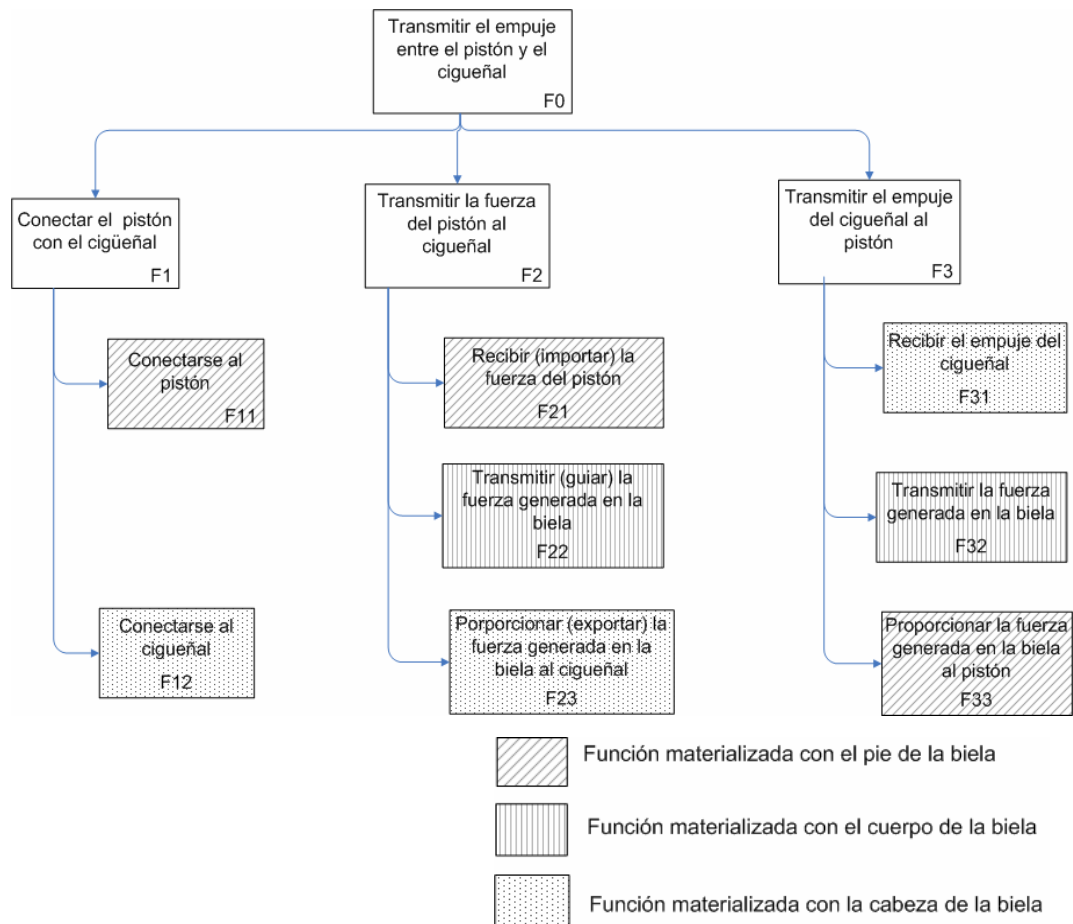


Figura 2-6: Estructura funcional y estructuras físicas de una biela de un motor de combustión interna de automóvil.

Generación del concepto

En esta actividad se definen las soluciones físicas de cada una de las estructuras identificadas en la arquitectura, Figura 2-6. Las soluciones físicas materializan dichas estructuras. Esta materialización incluye el dimensionamiento aproximado en términos de tamaño, forma, posición y orientación de los diferentes módulos funcionales (Van Wie, Mike J. et al., 2003). Las soluciones físicas se componen de los principios de trabajo y las estructuras de trabajo (Pahl et al., 1996).

Los principios de trabajo se definen para cada subfunción que tiene que cumplir el diseño y reflejan el efecto físico necesario para una función dada, así como características de la forma y del material (Pahl et al., 1996)

Las estructuras de trabajo resultan de la combinación de los diferentes principios de trabajo que en conjunto tienen que satisfacer las funciones generales del producto. La

estructura de trabajo no son más que las estructuras físicas en un nivel de materialización más elevado.

Definición de la configuración

En esta actividad se refinan los principios de trabajo y las estructuras de trabajo desde el punto de vista de: forma, material, proceso y disposición espacial. Con el objetivo de definir los módulos físicos y los componentes del diseño.

- Los módulos físicos son un conjunto de componentes que se integran formando un montaje estable, incluso sin ningún esfuerzo externo que mantenga todos los componentes juntos. Los módulos físicos se constituyen de un conjunto de componentes y también pueden contener otros módulos físicos (Van Wie, Mike J. et al., 2003).
- Un componente es una pieza física. Se constituye de especificaciones de material y geometría que describen la pieza (Van Wie, Mike J. et al., 2003).

El conjunto de los módulos físicos y los componentes forma la configuración de diseño. La configuración de diseño representa la distribución global y definitiva del producto que permite obtener una visión general del montaje, componentes y piezas, así como formas geométricas, dimensiones, materiales y proceso de fabricación. El resultado es la configuración definitiva (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996).

Refinar detalles de diseño

En esta actividad se refinan los detalles de material, forma y proceso, así como también otros componentes secundarios necesarios para satisfacer funciones auxiliares.

c. Evolución de la información

En los modelos de fases se puede considerar que la información evoluciona de un modo bastante secuencial. Esto significa que la información de cada actividad se define en bastante nivel de detalle antes de definir la información de la siguiente actividad. Por ejemplo, el análisis funcional es bastante completo antes de iniciar la definición de los requerimientos de producto (Ferrer et al., 2006b).

Como se observa en la Figura 2-7, partiendo de las necesidades de los clientes, se realiza el análisis funcional para obtener la estructura funcional del producto, compuesto de un conjunto de funciones generales y las subfunciones necesarias para satisfacer cada una de las funciones (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996). A continuación se definen los requerimientos de producto. Cuando el análisis funcional y los requerimientos ya están bastante definidos se determinan las soluciones físicas de diseño adecuadas para satisfacerlos. Por último, se detallan las propiedades de material, forma y proceso de las soluciones físicas definidas anteriormente.

Aunque se establece una cierta relación entre la información que se define y las etapas de diseño, las fronteras no son estáticas y las retroalimentaciones entre las fases y la información es un hecho común. Por ejemplo, durante la definición de las soluciones físicas se pueden definir algunas funciones auxiliares, a pesar que el desarrollo funcional

más importante ya se ha producido anteriormente (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996). Del mismo modo que durante el análisis funcional también se pueden definir los requerimientos del producto (Pahl et al., 1996).

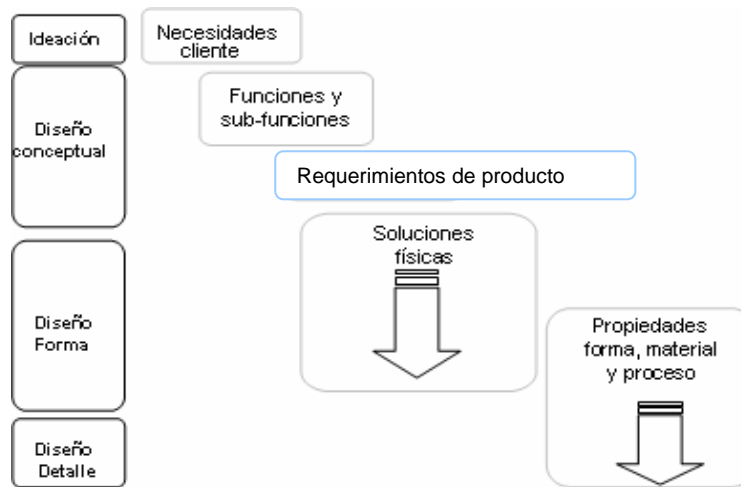


Figura 2-7: Evolución de la información en los modelos de diseño de fases

2.2.1.2. La teoría de Diseño Axiomático

La teoría de Diseño Axiomático (Suh, 1990; Suh, 2001) pretende desmarcarse de la perspectiva adoptada por la mayoría de los modelos de diseño desarrollados hasta el momento.

Según (Suh, 2001), en el pasado los ingenieros diseñaban los productos iterativamente, empíricamente e intuitivamente, basándose en años de experiencia, habilidad, ingenio, creatividad e implicando bastante el método de prueba y error. Aunque la experiencia es muy importante, pues genera conocimiento y experiencia sobre un diseño práctico, no es suficiente para garantizar el éxito del diseño final. El conocimiento de la experiencia debe ser aumentado mediante conocimiento sistemático del diseño, y viceversa (Suh, 1990; Suh, 2001)

Por este motivo el máximo objetivo de la teoría de Diseño Axiomático es establecer una base científica para diseñar y mejorar las actividades de diseño, proporcionando al diseñador fundamentos teóricos basados en lógica, procesos de pensamiento racional y herramientas (Suh, 1990). En resumen, desarrollar un método sistemático del proceso de diseño para el diseño de producto satisfactorio (Woon Cha y Rak Moon, 2000).

La teoría de Diseño Axiomático (Suh, 1990; Suh, 2001) estructura el proceso de diseño en cuatro dominios, propone un procedimiento sistemático para evolucionar la información de cada dominio y define unos axiomas que ayudan a tomar decisiones sobre las soluciones de diseño. Se expone a continuación cada uno de estos apartados.

a. Los dominios y la información del proceso de diseño

Los dominios representan la demarcación de las diferentes actividades del diseño. En el proceso de diseño se definen cuatro actividades que se engloban en cuatro dominios diferentes: el dominio de cliente, el dominio funcional, el dominio físico y el dominio del proceso (Suh, 2001). La estructura de los dominios expresada esquemáticamente se muestra en la Figura 2-8:

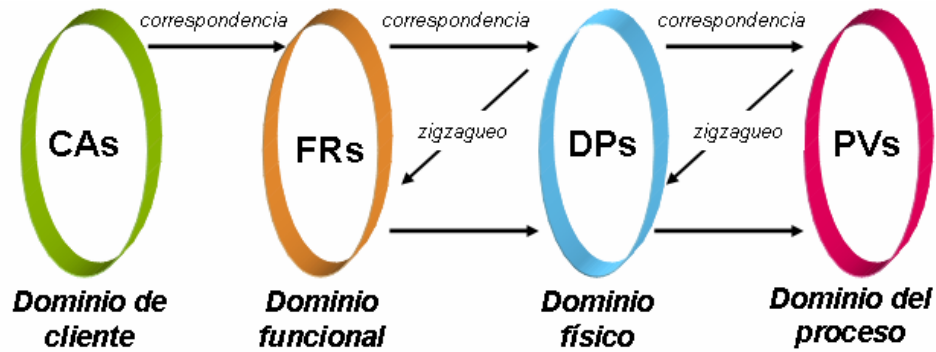


Figura 2-8: Dominios del proceso de diseño (Suh, 2001)

- El dominio del cliente está caracterizado por las necesidades que el cliente está buscando de un determinado producto, proceso, sistema o material. Estas necesidades se representan mediante los atributos del cliente (*Customer Attributes, CAs*).
- En el dominio funcional se define los requerimientos funcionales del producto (*Functional Requirements, FRs*) y se identifican las restricciones (*Constraints, Cs*). Los requerimientos funcionales representan lo que el producto tiene que hacer, es decir el conjunto de funciones que el producto tiene que satisfacer (Oosterman, 2001; Suh, 2001). Las restricciones actúan modificando a los requerimientos funcionales, delimitando así las fronteras de las posibles soluciones de diseño (Suh, 2001).
- En el dominio físico se definen los parámetros de diseño (*Design Parameters, DPs*) que hay que definir para satisfacer los requerimientos funcionales y las restricciones asociadas a cada uno de ellos. Los parámetros de diseño se refieren a conceptos, soluciones generales, propiedades de material y propiedades de forma que materializan el diseño. Aunque se definen en el dominio físico, no son todavía tangibles en este estado (Oosterman, 2001).
- Finalmente, en el dominio de procesos hay que definir las variables del proceso (*Process Variables, PVs*). Las variables del proceso (PVs) se definen como las variables claves que caracterizan el proceso que hay que desarrollar para generar los DPs definidos en el dominio físico.

La teoría de Diseño Axiomático define el proceso de diseño como la materialización un producto, proceso, sistema o material para satisfacer los requerimientos funcionales

(Woon Cha y Rak Moon, 2000), basándose en la estructura de dominios y la información asociada a cada uno de ellos. Con lo cual el diseñador debe entender y resolver el problema desde el punto de vista funcional.

b. Evolución de la información.

En cualquier procedimiento de diseño, la información se define, evoluciona y trasforma a lo largo del proceso de diseño. Así pues, la teoría de Diseño Axiomático define la información de cada dominio mediante un proceso de correspondencia entre los diferentes dominios, y la evoluciona mediante un procedimiento de zigzag que da lugar a la descomposición de dicha información.

- El proceso de correspondencia es la acción que permite definir la información de cada dominio para un mismo nivel de detalle. Para ello, la teoría de Diseño Axiomático define el diseño como una interacción o correspondencia entre qué se quiere conseguir y cómo se quiere conseguir estos qué (Figura 2-9).

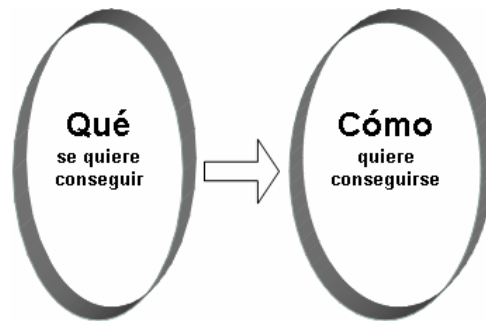


Figura 2-9: Interacción del proceso de diseño: relación entre qué y cómo (Suh, 2001)

Aplicando esta correspondencia entre *qué* y *cómo* a la anterior Figura 2-8, el dominio de la izquierda, relativo al de la derecha, representa “que se quiere conseguir”, mientras que el dominio de la derecha representa “como se quiere conseguirlo”. Por ejemplo los FRs representan “qué” se quiere conseguir, mientras que los DPs “cómo” pueden conseguirse dichos FRs. Durante el proceso de diseño, hay que ir del dominio de la izquierda hacia el dominio de la derecha, es decir establecer una correspondencia entre el “qué” y “cómo” de forma secuencial entre los dominios.

Aplicando esta correspondencia al caso de la biela de un MCIA, un ejemplo de “qué” se quiere conseguir en el dominio funcional sería “transmitir la fuerza del pistón al cigüeñal”. La definición de “cómo” este requerimientos funcional podría obtenerse sería definiendo la “sección resistente del componente” en el dominio físico. Considerando que se quiere conseguir una determinada “sección resistente” en el dominio físico, se tendría que determinar “cómo” se va a conseguir en el dominio de proceso, por ejemplo identificando el tipo de proceso de fabricación.

En la Figura 2-10 se puede ver esquemáticamente este proceso de correspondencia entre dominios. Partiendo de las necesidades del cliente (CAs) se definen los requerimientos funcionales (FR1) que el producto tiene que satisfacer.

Posteriormente partiendo de los requerimientos funcionales de primer nivel (FR1) se definen los parámetros de diseño (DP1) que son necesarios para satisfacer dichos requerimientos funcionales. A continuación, se determinan las variables de proceso (PV1) que son necesarias para obtener los parámetros de diseño (DP1) del dominio anterior.

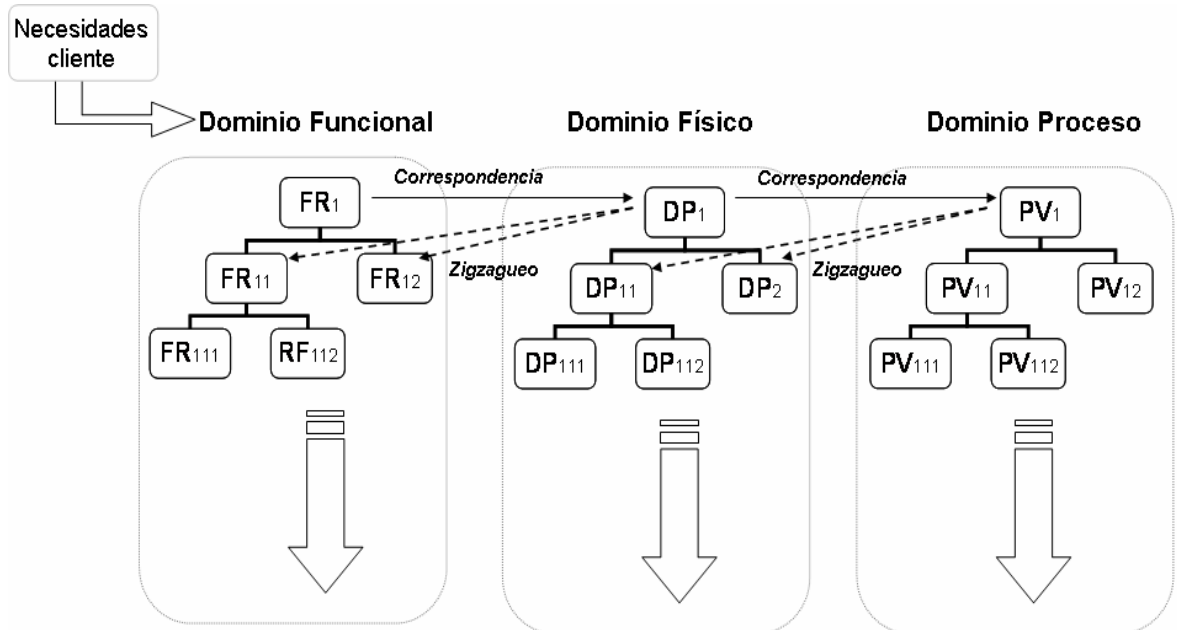


Figura 2-10: Correspondencia, zigzag y jerarquías de la información de los dominios de diseño

Cuando el primer nivel de definición de la información para los tres dominios ha sido completado (FR₁, DP₁ y PV₁), se procede a definir la información del siguiente nivel mediante un proceso de zigzag. De este modo se obtiene la información de los dominios en un nivel más detallado.

- El proceso de zigzag es la acción que permite evolucionar la información de los diferentes dominios hasta obtener el diseño final. El zigzag define los “qués” de un segundo nivel, en función de los “cómos” del nivel anterior. Como se observa en la, Figura 2-10 la definición de la información en este segundo nivel dependerá de las decisiones que se han tomado en el nivel anterior. Es decir, los requerimientos funcionales del segundo nivel (FR₁₁ y FR₁₂) dependerán de los parámetros de diseño (DP₁) que se han decidido en el nivel anterior; del mismo modo que los parámetros de diseño (DP₁₁ y el DP₁₂) dependerán de las variables de proceso (PV₁) del nivel anterior.

Por ejemplo, en el caso de la biela, para obtener un determinado parámetro de diseño, como el “tipo de sección resistente”, se podría elegir el proceso de forja de matriz cerrada en el dominio de proceso. Posteriormente, en el siguiente nivel de descomposición, las decisiones sobre los parámetros de diseño relacionados con el

“tipo de sección resistente”, como por ejemplo el “espesor mínimo” de dicha sección, estarán afectadas por el proceso de fabricación que se ha decidido en el nivel anterior

El resultado de este zigzagueo da lugar a la descomposición de la información para cada uno de los dominios del proceso de diseño, de menor a mayor grado de detalle. Por lo que se genera una jerarquía de dicha información.

Se concluye que en la teoría de Diseño Axiomático la evolución de la información se produce de forma paralela para los tres dominios (Suh, 2001; Ferrer et al., 2006b).

c. Axiomas de diseño

La teoría de Diseño Axiomático postula dos axiomas que gobiernan el proceso de diseño y que deben cumplirse para el correcto desarrollo del mismo (Suh, 2001): el Axioma de Independencia y el Axioma de Información.

- El Axioma de Independencia declara que cuando hay dos o más requerimientos funcionales, la solución de diseño debe ser aquella que permita que cada uno de los FR pueda ser satisfecho sin afectar al otro FR. Esto significa que entre todos los conjuntos de parámetros de diseño (DPs) que pueden ser adecuados para satisfacer un conjunto de FRs, hay que elegir aquellos que mantengan su independencia funcional. Es decir aquellos que satisfagan a cada uno de los FRs de forma independiente (Yang y Zhang, 2000; Suh, 2001).
- El Axioma de Información declara que entre todos los diseños que satisfacen la independencia funcional, el mejor diseño será aquel que tenga el menor contenido de información. El contenido de información se mide mediante la probabilidad de conseguir los objetivos de diseño expresados en los FRs. Así pues, el mejor diseño siempre será aquel que tenga dicha probabilidad más alta.

El Axioma de Información proporciona una medida cuantitativa de las ventajas de un diseño dado, y por lo tanto, es provechoso para seleccionar el mejor diseño entre todos los diseños que son aceptables. Suh (Suh, 2001) propone un procedimiento para el cálculo de dicha probabilidad.

2.2.1.3. La técnica del Despliegue de la Función de Calidad

El Despliegue de la Función de Calidad (*Quality Function Deployment, QFD*) es un procedimiento sistemático para asegurar la calidad a través de cada fase de desarrollo de producto, desde el diseño hasta la producción (Akao, 1990). Entendiendo la calidad como la satisfacción de las necesidades del cliente.

La metodología de QFD nació de las actividades de Control de la Calidad Total (*Total Quality Control, TQC*) en Japón durante los años 60. Su desarrollo fue motivado por dos aspectos (Cristiano et al., 2000): (a) cómo diseñar un nuevo producto para satisfacer las necesidades de cliente, y (b) por el deseo de proporcionar control de calidad (*Control Quality, CQ*) al proceso de fabricación antes iniciar su producción. Sin embargo, su amplio alcance permite considerar que esta metodología proporciona un marco estructurado que

propaga las necesidades del cliente a través de todas las fases del desarrollo de producto (Sorli y Ruiz, 1994; Cristiano et al., 2000; Vila, 2000). Dicho de otro modo, esta técnica puede utilizarse como un procedimiento sistemático en el desarrollo de un producto, desde su diseño hasta su producción, con el objetivo de garantizar que las necesidades del cliente sean consideradas en cualquier fase de desarrollo del producto (Oosterman, 2001).

La técnica de QDF se basa en el desarrollo de gráficos de calidad. Un gráfico de calidad es una matriz o conjunto de matrices para correlacionar todo el desarrollo de producto, desde el diseño hasta la producción (Akao, 1990). Esta correlación se representa con el Macro Flujo del QFD (Sorli y Ruiz, 1994), Figura 2-11. Desde un punto de vista más concreto, un gráfico de calidad es una matriz bidimensional que relaciona entradas y salidas (Akao, 1990).

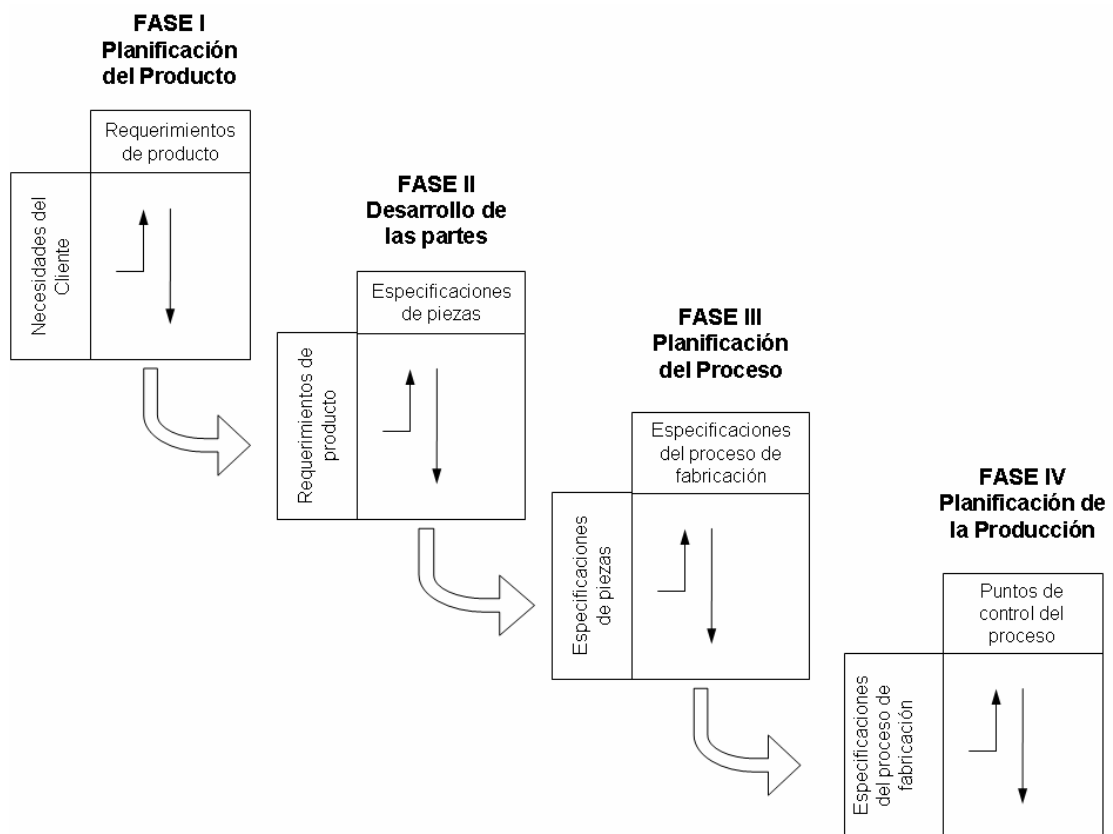


Figura 2-11: Macro Flujo del QFD (fuente de: (Sorli y Ruiz, 1994))

El Macro Flujo del QFD se desarrolla en cuatro etapas.

- Etapa 1: Planificación del producto del QFD

En esta etapa, las necesidades del cliente se traducen a requerimientos de producto, también conocidos como características de calidad, en esta técnica. Los

requerimientos de producto se priorizan desde la perspectiva del cliente y se asignan sus valores objetivo. La matriz que se obtiene en esta etapa se conoce como la casa de la calidad (*House of Quality, HOQ*) y generalmente es la matriz más aplicada (Sorli y Ruiz, 1994; Cristiano et al., 2000)

- Etapa 2: Desarrollo de las piezas

En esta etapa, los requerimientos de producto se traducen a especificaciones de piezas, componentes o subsistemas que forman el producto. Inicialmente se examina la relación entre los requerimientos de producto y los distintos componentes o piezas del diseño. Posteriormente, se priorizan estos componentes o piezas en función de su capacidad para satisfacer los requerimientos. Finalmente se definen las especificaciones de los mismos.

- Etapa 3: Planificación del proceso

En esta fase, se traducen a las especificaciones de las piezas a especificaciones del proceso de fabricación. Inicialmente se explora la relación de las especificaciones de las piezas con los procesos de fabricación que se van utilizar en la producción de las mismas. Finalmente se identifican las operaciones y las especificaciones de los parámetros del proceso claves para llevar a cabo las especificaciones de las piezas.

- Etapa 4: Planificación de la producción.

En esta fase, se traducen las operaciones y las especificaciones de los parámetros del proceso claves en los puntos que hay que controlar durante el proceso para asegurar la calidad de las piezas claves y de su fabricación.

Aunque estas fases se pueden considerar las fases más relevantes en la técnica del QFD, según (Akao, 1990), un despliegue de calidad de gran alcance debe integrar el despliegue de la calidad (equivalente al Macro Flujo de QFD), el despliegue de la tecnología, el despliegue de los costes y el despliegue de la fiabilidad (Sorli y Ruiz, 1994)

Según (Sorli y Ruiz, 1994; Vila, 2000) esta técnica está en concordancia con la filosofía de la Ingeniería Concurrente. Principalmente, por el desarrollo en paralelo de las diferentes fases del desarrollo del producto y porque la aplicación de este técnica se lleva a cabo por equipos multidisciplinares, en los cuales la comunicación y la gestión son aspectos claves para garantizar el éxito de la implementación.

2.2.2. Definición y formalización de la información en el proceso de diseño

Como se ha reflejado en el apartado 2.2.1, las metodologías que tratan el proceso de diseño exponen una estructura detallada del mismo, definen las actividades que deben llevarse a cabo en cada una de sus fases y declaran el flujo de información que permite alcanzar el diseño final. Aunque estas metodologías son básicas para organizar y desarrollar este complejo proceso, la definición de la información no es en ningún momento menos importante para alcanzar el objetivo final garantizando el éxito del diseño. En definitiva, la

información de diseño relacionada con los requerimientos funcionales, las restricciones, los parámetros de diseño y las variables de proceso.

Considerando la relación entre esta información y su procedimiento de evolución, parece lógico pensar que una mala definición de la misma implicará errores que conducirán a un mal avance en el diseño, que derivará en un mal diseño que no cumplirá con las expectativas del cliente. Por ello, definir la información de forma explícita y completa en cualquier momento de diseño es también un aspecto fundamental para garantizar que el diseño final cumpla con las expectativas o necesidades del cliente (Chakrabarti et al., 2004).

La información definida de forma explícita se refiere a que la información de diseño debe estar expresada sin ambigüedades, con una expresión verbal suficientemente clara y precisa para que haya un sólo modo de interpretarla. La información de diseño explícita debe definir y representar una única intención, y no debe generar ambigüedad ni en su definición ni en su interpretación; es decir debe referirse a un único significado y sólo debe haber un modo de interpretar la información. No obstante, la definición explícita de la información de diseño es una tarea compleja asociada a un amplio campo de investigación (Alexander y Stevens, 2002; Perez et al., 2005; Hunter et al., 2006; Rios et al., 2006; Takeda, et al, 3w).

La información de diseño completa significa que tiene que contener toda la información necesaria para que pueda ser interpretada correctamente; sin omitir información, pero sin añadir información superflua.

La Tabla 2-4 muestra algunos ejemplos de definición completa y explícita de información de diseño asociada con una biela de un MCIA.

Información	Definición completa y explícita
Requerimiento funcional	“El sistema tiene que soportar una carga de compresión entre 20-25 kN”.
Parámetro de diseño	“La tensión mínima del material debe ser de 800 MPa
Variable del proceso	“El tiempo de enfriamiento debe estar comprendido entre [5-7] minutos”

Tabla 2-4: Definición completa y explícita de la información de diseño de una biela de un motor de combustión interna de automóvil.

Contrariamente, cuando la información es implícita puede entenderse e interpretarse de diferentes formas. Por ejemplo declarar que una aplicación informática tiene que tener “un entorno amigable”. En este caso, la interpretación del diseñador y la del cliente podrían ser diferentes, y como consecuencia se podría obtener un diseño que no cumpliera con las expectativas esperadas por dicho cliente.

Cuando la información es incompleta no se puede tener en cuenta, así pues, el diseño final tampoco cumplirá con las expectativas. Por ejemplo no especificar el rango de valores del peso máximo de una pieza.

La definición explícita y completa de la información de diseño es un hábito común cuando el diseño está en una fase avanzada, pues la información en esta fase es clara, precisa y específica. Sin embargo en fases iniciales del diseño la información acostumbra a ser más general, agregada e imprecisa, y como consecuencia, la definición explícita y completa de la información de diseño no es un hábito tan común (Chakrabarti et al., 2004). En el siguiente apartado se exponen las diferentes investigaciones realizadas en el desarrollo de procedimientos sistemáticos para definir y formalizar la información de la fase de diseño conceptual.

2.2.2.1. Definición y formalización de la información en diseño conceptual

En la fase de diseño conceptual la definición de información de diseño cobra una gran importancia. Como se ha visto en el apartado 2.2.1, el diseño conceptual es la fase donde se define la información relacionada con los objetivos del diseño y los requerimientos que este debe satisfacer, así como también, las primeras estructuras físicas que formarán el diseño final.

La definición y formalización de la información de diseño conceptual en el diseño de producto se ha tratado desde varias disciplinas, entre ellas la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Requerimientos. En ambas disciplinas se ha hecho uso de las técnicas propuestas por otras áreas como es la Representación del Conocimiento.

Generalmente, los esfuerzos se han centrado en proponer métodos formales que permiten definir la información de un modo explícito y completo. Para ello se han propuesto procedimientos sistemáticos que permiten interpretar la información expresada en lenguaje natural. Estos procedimientos se basan en la representación semántica y sintáctica de dicha información.

La representación de información de diseño comprende dos aspectos (Deng, 2002): la semántica y la sintaxis. La semántica afecta a la definición de las características del objeto, las cuales reflejan el entendimiento del usuario y del diseñador. Por ejemplo la definición semántica de una función sería: “la función representa qué tiene que hacer el producto”. La sintaxis afecta a como dichas definiciones y el propio objeto pueden ser representados, por ejemplo en un programa informático, de modo que la información pueda ser fácilmente definida, recuperada, editada y manipulada por el diseñador. En el caso de la función la estructura sintáctica sería: “verbo activo” (transmitir) + “objeto” (carga). Según (Alexander y Stevens, 2002) la definición de la información del proceso de diseño, no sólo tiene que ser estudiada desde el punto de vista semántico, sino que la estructura sintáctica también se considera un punto clave para su correcta interpretación. El uso del lenguaje natural es habitual para representar información asociada con diseño. Ejemplos de lenguaje natural son el inglés, español o francés.

A continuación se exponen los trabajos que se han desarrollado para definir y representar la información del diseño conceptual, concretamente las funciones y los requerimientos de producto.

a. Función

Los primeros trabajos sobre el desarrollo de procedimientos sistemáticos para definir la información del proceso de diseño tienen sus orígenes en la definición de la función. Desde el punto de vista semántico la función se define como la relación entre los flujos de entrada y salida de un sistema cuyo objetivo es llevar a cabo una tarea. Las funciones representan “qué” tiene que hacer el producto para satisfacer las necesidades del cliente, independientemente de cualquier solución física (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001). Desde el punto de vista sintáctico, las funciones son normalmente definidas mediante declaraciones formadas por un verbo y un nombre (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001; Deng, 2002). El verbo representa la acción o la función, mientras que el objeto representa el flujo de material, energía o señales con los que opera la función.

Considerando esta definición semántica y sintáctica de la función, las definiciones en el ámbito funcional han evolucionado notablemente. Se han desarrollado taxonomías relacionadas con los verbos y con los flujos que definen las funciones, así como también estructuras sintácticas más detalladas (Otto y Wood, 2001). Un ejemplo de ello es la definición del flujo propuesta por (Otto y Wood, 2001), en la cual el flujo se define mediante el flujo básico, una clase de flujo y un complemento, Tabla 2-5.

Verbo	Flujo Básico	Clase de flujo	Complemento
Recibir	energía	humana	de fuerza
Transferir	energía	humana	de movimiento
Transferir	energía	mecánica rotacional	
Transportar	material	sólido	

Tabla 2-5: Ejemplo para definir funciones según la taxonomía de verbos y flujos propuesta por (Otto y Wood, 2001).

Otra estructura de la función bastante completa y similar a la anterior es la propuesta por (Takeda, et al, 3w). Esta investigación declara que una función es una combinación de: “cuerpo de la función” (*function body*), “entidad del objetivo” (*objective entity*) y “modificadores funcionales” (*functional modifiers*).

- El “cuerpo de la función” es el portador de la función y normalmente se representa con un verbo, como por ejemplo “llevar” o “soportar”.
- La “entidad del objetivo” es la entidad sobre quien/que recae la función, y se representa mediante la estructura del diseño.
- Los “modificadores funcionales” limitan la función y normalmente se representa mediante un adverbio, como “precisamente” o “firmemente”.

La diferencia principal entre el “cuerpo de la función” y un “modificador funcional” es el grado de satisfacción del cliente. El grado de satisfacción del “cuerpo de la función” es

“sí” o “no”, es decir si el diseño puede o no llevar a cabo la función; no hay un estado intermedio. En cambio un “modificador funcional” tiene grado de satisfacción. Esto significa que es posible juzgar cómo de “firmemente” se sujeta un objeto y que se puede comparar dos diseños mediante el grado de satisfacción de los “modificadores funcionales”. En otras palabras, los “modificadores funcionales” son índices que caracterizan el grado en que una función es conseguida..

La utilización de un método estructurado para representar información permite que su interpretación sea más sencilla.

b. Requerimientos

Los requerimientos de producto se consideran el punto de partida del proceso de diseño. Como ya se ha definido en el apartado 2.2.1.1, los requerimientos del producto representan la interpretación de las necesidades del cliente desde un punto de vista cuantificable, medible y validable (Ríos et al., 2006), y por ello se convierten en el punto de partida del proceso de diseño. El éxito del diseño dependerá de la correcta definición de mismos.

Existen trabajos que proponen métodos formales para definir los requerimientos en el ámbito de Ingeniería de Requerimientos y de Ingeniería de Producto.

Desde el ámbito de la Ingeniería de Requerimientos, (Alexander y Stevens, 2002) define el término requerimiento como: “una declaración estructurada de lo que un usuario o cualquier otro miembro relacionado con el diseño (*stakeholder*) necesita”, y propone una estructura básica para su definición. (Alexander y Stevens, 2002) define que la anatomía de un buen requerimiento debe contener: el tipo de usuario, el tipo de resultado, el objeto y el calificador.

- El tipo de usuario se refiere a quien se beneficia del requerimiento.
- El tipo de resultado es la declaración de la necesidad o la acción.
- El objeto y el calificador se refieren a aquello que el usuario quiere o desea alcanzar, pero considerando que debe contener el mecanismo que permita comprobar el cumplimiento del requerimiento.

La Tabla 2-6 muestra un ejemplo de este método de formalización.

Tipo de usuario	El operario...
Tipo de resultado	...debe ser capaz de ver...
Objeto	...la luz de la alarma...
Calificador	...desde dos metros de distancia

Tabla 2-6: Ejemplo de la definición de un requerimiento según la anatomía propuesta por (Alexander y Stevens, 2002)

Desde el ámbito de la Ingeniería de Diseño, Hunter (Hunter et al., 2005; Hunter et al., 2006) propone un método de formalización de los requerimientos funcionales aplicado al

diseño de utillajes. Para ello se basa en la anatomía propuesta por Alexander (Alexander y Stevens, 2002) y modifica algunos conceptos de la definición sintáctica de función propuesta por Takeda (Takeda, et al, 3w).

La estructura de los requerimientos funcionales propuesta por Hunter (Hunter et al., 2005; Hunter et al., 2006) se compone de cuatro componentes principales (Figura 2-12): la acción, el objeto, el recurso, y los calificadores.

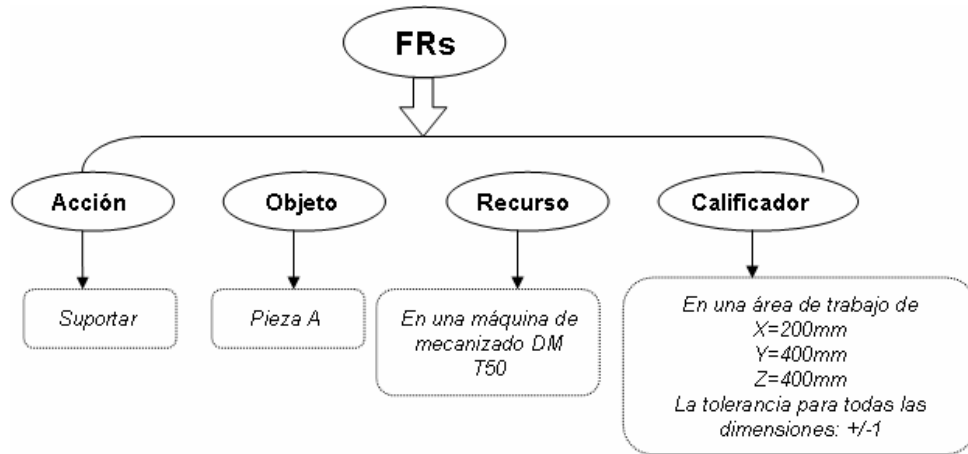


Figura 2-12: Estructura de un requerimiento funcional (fuente de: (Hunter et al., 2006))

- La acción se refiere a la función del utillaje y se expresa con un verbo activo.
- El objeto se refiere al objeto físico en el cual se realiza la acción y se expresa mediante un sustantivo.
- El recurso se refiere a dónde se realiza la acción y se expresa mediante la máquina donde se realiza la acción.
- Los calificadores se refieren a los límites de los requerimientos funcionales, y permiten representar las restricciones asociados a ellos. Los calificadores se expresan mediante un grupo de adjetivos cuantitativos o un grupo de nombres. Cada calificador cuantitativo debe tener por lo menos un valor numérico nominal, una unidad de la medida y una tolerancia. Cada requerimiento funcional debe tener por lo menos un calificador cuantitativo. Sin embargo, asumiendo que los requerimientos y las restricciones se van refinando en la medida que el diseño avanza, la especificación de los calificadores puede no tener valores numéricos cuando se definen inicialmente; pero en la etapa final, cuando las restricciones tienen ser que consideradas para seleccionar una solución de entre todas las posibles, los valores numéricos tienen que ser declarados (Rios et al., 2006)

Los procedimientos sistemáticos para formalizar y definir la información de diseño pueden ayudar al diseñador a identificar:

1. qué conoce al inicio de cada tarea,
2. qué debe obtener al final de la misma

De este modo se podría conseguir que la información de diseño evolucionase asegurando que los requerimientos inicialmente definidos son satisfechos en el diseño final.

2.2.3. Discusión

La revisión de la literatura del proceso de diseño permite constatar que es un proceso complejo y con un campo de investigación muy diversificado. La complejidad asociada a la actividad de diseñar se refleja tanto desde el punto de vista del procedimiento que hay que seguir para ello, incluyendo las fases y las actividades, como desde el punto de vista de la información que hay que definir hasta obtener el diseño final.

La discusión que se plantea en este apartado tiene por objetivo resaltar aquellos aspectos, del proceso de diseño de producto, que resultan fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

- Desde el punto de vista de la finalidad básica del diseño, todos los modelos tratados en esta tesis coinciden en resolver el proceso de diseño para satisfacer la funcionalidad que el cliente espera del producto, es decir, que el cliente encuentre el comportamiento deseado de producto. Esto significa que considerar los requerimientos funcionales junto con las restricciones asociadas a ellos es un punto clave y fundamental para garantizar el éxito del diseño.
- Desde el punto de vista de la información que hay que definir durante el proceso de diseño, la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001) declara de forma explícita la información de diseño mediante la estructura de los cuatro dominios. Las necesidades o atributos de cliente (CAs) en el dominio de cliente, los requerimientos funcionales (FRs) y las restricciones (Cs) en el dominio funcional, los parámetros de diseño (DPs) en el dominio físico y las variables del proceso (PVs) en el dominio de proceso.

Además esta teoría postula que el diseño debe evolucionar definiendo la mínima información necesaria en cada dominio para satisfacer la funcionalidad del producto. Esto implica definir la información de diseño que es realmente necesaria para satisfacer los requerimientos funcionales y sus restricciones. Esta información afecta a los parámetros de diseño y las variables del proceso.

- Desde el punto de vista de la definición de la información de diseño, referida a la información de los dominios anteriormente citados, definir la información de forma completa y explícita en cualquier etapa de diseño es también un aspecto fundamental para garantizar que el diseño final cumpla con las expectativas o necesidades definidas.

Existen métodos de diseño y herramientas que asisten al diseño para hacer la información de diseño más explícita, como la teoría de Diseño Axiomático o la técnica de QFD; aunque su uso es bastante limitado. En el caso concreto de la técnica del QFD se limita en gran medida a la utilización de la primera matriz, que normalmente se conoce como la Casa de la Calidad, y en el caso de teoría de Diseño Axiomático, no se tiene evidencia de que industrialmente se esté empleando. La complejidad asociada a la aplicación de estos métodos es una razón que justifica su poco uso.

Es cierto que los trabajos en la dirección de definir y formalizar la información de diseño conceptual están creciendo en los últimos tiempos, y un reflejo de ello es el resultado de esta tesis. Pero también es cierto que su integración en los procedimientos de diseño propuestos por la Ingeniería de Diseño es realmente lenta.

- Desde el punto de vista del uso de las metodologías de diseño, los procedimientos sistemáticos desarrollados han resultado de gran utilidad en el entorno de diseño real. El éxito de estos procedimientos queda completamente declarado con el uso habitual de estas metodologías por la gran mayoría de los diseñadores, especialmente los modelos de fases. Los modelos de artefacto, entre los que se incluye la metodología de Diseño Axiomático y la técnica del QFD, no resultan de uso tan común por los diseñadores. Pues generalmente estos procedimientos requieren de diseñar en muchos niveles de abstracción y con la información muy explícita. Normalmente estos modelos se usan para resolver actividades concretas del proceso de diseño, por ejemplo según Ullman (Ullman, 1992) la teoría de Diseño Axiomático se puede usar para definir conceptos o la técnica del QFD para determinar los requerimientos y restricciones partiendo de las necesidades de cliente. A pesar de ello, hay que reconocer que su estructura sistemática y algunos de los principios de diseño que declaran pueden ser utilizados en el desarrollo de procedimientos sistemáticos para la captura de información.
- Desde el punto de vista de la relación del proceso de fabricación con el diseño, todas las metodologías de diseño coinciden que el proceso de fabricación tiene un efecto relevante sobre la definición física del producto y sobre el cumplimiento funcional del mismo.

La metodología de Diseño Axiomático expone claramente la presencia del proceso de fabricación en el diseño y las relaciones entre ambos desde las fases iniciales del mismo. Así lo declara la estructura de dominios y la relación entre ellos. Además hace explícita la relevancia del dominio de proceso en el cumplimiento de los requerimientos del producto, a través del dominio físico. Es decir, el dominio de proceso afecta para obtener las soluciones de diseño del dominio físico, las cuales se definen para satisfacer los requerimientos del dominio funcional. La relación entre el dominio del proceso y el dominio físico se establece en cualquier fase del diseño.

En general, se puede afirmar que Suh (Suh, 1990; Suh, 2001) durante su investigación trata en mayor profundidad el dominio funcional, el dominio físico y la relación entre ambos.

Los modelos prescriptivos de fases no especifican de forma tan explícita el momento en el que debe ser considerado el proceso de fabricación en el diseño, aunque generalmente lo sitúan en la fase de diseño de materialización (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Dieter, 2000). Todos ellos exponen la importancia que el proceso tiene sobre el diseño, sin embargo es Ullman (Ullman, 1992) quien pone más en evidencia de la relevancia del proceso en el diseño mediante la relación: función, forma, material, proceso.

En general se podría concluir que la integración del diseño y del proceso de fabricación no se ha tratado de forma muy profunda desde la perspectiva de la Ingeniería de Diseño de Producto. En cambio no sucede lo mismo cuando se analizan los trabajos realizados desde la perspectiva de la Ingeniería de Fabricación

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Fabricación esta integración ha sido de interés desde los años 50. Los diferentes campos y líneas de investigación desarrolladas en el ámbito de la integración del proceso de fabricación en el diseño se exponen a continuación en la segunda parte de estado del arte de esta tesis

2.3. Integración del proceso de fabricación en el diseño de producto

Las raíces de la integración del proceso de fabricación en el diseño de producto se remontan a antes de la segunda Guerra Mundial. La escasez de recursos disponibles, junto con la presión social y política para acortar el tiempo de desarrollo de las armas fueron los principales factores de motivación para impulsar dicha integración. Muchos de los mosquetones desarrollados con éxito durante ese período fueron diseñados por equipos pequeños, integrados y multidisciplinarios (Gupta et al., 1995).

Como resultado de ello, a mediados de los años 50 aparecieron los primeros libros especializados, conocidos como *handbooks*. Estos libros contemplan información de varios procesos de fabricación desde el punto de vista del diseñador. Entre ellos destacar el editado por Roger W. Bolz (Bralla, 1999).

Durante los años 60, varias empresas desarrollaron guías de fabricación para ser usadas durante el diseño de producto. Entre ellas se destaca la publicación de uso interno de la empresa General Electric Corporation (Kuo et al., 2001)

A finales de los años 70, el crecimiento de la competencia global, la creciente complejidad de los diseños, la expansión de los procesos de fabricación y el deseo de reducir los tiempos y los costes en el desarrollo de producto dio lugar al resurgimiento de esta integración entre diseño y fabricación en el desarrollo de producto (Gupta et al., 1995). Los primeros intentos de desarrollar el proceso de fabricación paralelamente al proceso de diseño resultaron en diseños más eficientes desde el punto de vista de coste, calidad y tiempo de desarrollo (Ullman, 1992; Vila, 2000). Como resultado de ello, a finales de los años 70 y principios de los 80, se originó un nuevo procedimiento de desarrollo de productos denominado Ingeniería Simultánea. La Ingeniería Simultánea tenía el objetivo de desarrollar paralelamente el diseño y el proceso de fabricación de producto.

Inicialmente, la integración de la fabricación en el diseño se focalizó en el diseño para la fabricación de piezas individuales (Kuo et al., 2001). Pero no tardó en extenderse al montaje del conjunto, dando lugar a las herramientas de diseño para el montaje (*Design for Assembly, DFA*) (Boothroyd et al., 2002).

La aparición de las herramientas de DFA impulsaron el origen del término de diseño para la fabricación (*Design for manufacturing, DFM*) para referirse a la integración del proceso de fabricación en el diseño de piezas. Por lo tanto, aunque dicha integración tiene sus orígenes en los años 50, el término conocido como Diseñar para Fabricar (DFM) no es utilizado hasta los años 80.

Esta forma de diseñar no tardó en extenderse a otras actividades del desarrollo de producto. Los investigadores se percataron que también era importante considerar otros aspectos del ciclo de vida del producto, a parte de las restricciones de fabricación y de montaje, antes de tomar decisiones importantes sobre el diseño (Kuo et al., 2001). Lo cual dio lugar al concepto de “Diseñar para el ciclo de vida del producto”. El ciclo de vida del producto incluía las diferentes etapas que recorre un producto desde su concepción hasta su retirada (Pahl et al., 1996; Vila, 2000). La integración de estas etapas en la fase de diseño conducía a diseños más óptimos desde el punto de vista de calidad, costes y tiempo de desarrollo (Kuo et al., 2001). Este nuevo enfoque, originado durante los años 80, condujo a una nueva filosofía en el desarrollo de productos denominada la Ingeniería Concurrente (Ullman, 1992). Tomando como fundamento los principios de la Ingeniería Concurrente, la tendencia en el desarrollo de productos ha ido ampliando su contexto en la dirección de aumentar la colaboración en el desarrollo del mismo, desde dentro de la propia empresa hasta el mercado, como pueden ser los proveedores. Esta nueva filosofía se conoce como Ingeniería Simultánea y Colaborativa (Willaert et al., 1998; Vila, 2000), y en ella, las tecnologías de la información tienen una gran importancia para facilitar el intercambio de información.

Los métodos de diseñar para fabricar (DFM) proporcionaban a los ingenieros conocimiento y recomendaciones sobre los procesos de fabricación para reducir el tiempo de desarrollo, el coste de producción y reducir los defectos. No obstante, a pesar de la abundante literatura de los procesos de fabricación y de las metodologías de DFM para los procesos individuales, también era necesario cubrir otras áreas de investigación relacionadas con la integración de fabricación en el diseño. Por ello, a finales de los 80 y principios de los 90, se empezó a investigar en el campo de la selección de procesos de los fabricación que debía realizarse previa al DFM. Esta área de investigación incluía desarrollar técnicas de ayuda para la toma de decisiones que contuvieran información sobre diversos procesos de fabricación, para evaluar la viabilidad de cada proceso en relación a las necesidades de los diseñadores, y para asistir en la selección del proceso más apropiado (Ishii et al., 1993).

Tras una revisión histórica de la evolución de la integración del proceso de fabricación en el proceso de diseño, los diferentes campos de investigación que se han desarrollado dentro de este dominio de aplicación son los siguientes (Gupta et al., 1995; Kuo et al., 2001; Herrman et al., 2004):

- En la fase de diseño conceptual y en la fase de diseño de materialización se destacan los campos de investigación de la selección de procesos de fabricación y el diseño para la fabricación. La selección de los procesos de fabricación tiene la finalidad de determinar o elegir aquellos procesos que son técnicamente y económicamente viables para un diseño dado. Se destacan los trabajos de (Ishii et al., 1991; Giachetti, 1997; Esawi y Asbhy, 1998; Smith et al., 2003; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004; Zha, 2005). El diseño para la fabricación tiene como trasfondo principal asegurar que el diseño es fabricable para un proceso dado, así como también explicitar los beneficios que un proceso determinado puede proporcionar para un diseño dado. Se destacan los trabajos de (Bralla, 1999; Boothroyd et al., 2002).
- En la fase de diseño de detalle se destacan los trabajos relacionados con el desarrollo de sistemas integrados en los sistemas CAD (*Computer Aided Design*), como los sistemas CAPP (*Computer Aided Process Planning*) (Ciurana et al., 2006; Ciurana et al., aceptado 10/2007) y los CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Estos sistemas, CAPP y CAM, permiten planificar el proceso durante las fases finales del diseño. Esos sistemas han tendido más hacia la planificación del proceso que hacia el diseño del producto. Por lo tanto están más en el campo de investigación de la planificación del proceso, que en el diseño en sí (Gonzalez, 2001).

Este trabajo se va a centrar en las investigaciones desarrolladas para la fase de diseño conceptual y de la fase de diseño de materialización. Es decir, en el ámbito de la selección de procesos de fabricación y el diseño para la fabricación. Se expone a continuación los trabajos que se han desarrollado en cada una de estos campos de investigación, así como también las herramientas que se han derivado de dichas investigaciones.

2.3.1. Selección de los procesos de fabricación

La selección de los procesos de fabricación tiene el objetivo de asistir al diseñador en la decisión de determinar los procesos de fabricación que son capaces de fabricar una pieza cumpliendo con sus requerimientos y restricciones de diseño.

No obstante, la selección de los procesos no se puede tratar de modo independiente de las otras áreas de selección del proceso de diseño: el material y la forma. Pues como se ha comentado en la sección a del apartado 2.2.1.1., la solución óptima de diseño se obtiene si las decisiones de la selección del material, la forma y el proceso se realizan de un modo simultáneo (Lovatt, 1998). Por consiguiente, es necesaria una continua iteración entre las tres áreas de decisión.

A pesar de ello, bastantes investigadores coinciden en que existe cierto grado de secuencia entre estas tres áreas de decisión. Según Pahl (Pahl et al., 1996), inicialmente se realiza la elección de la forma preliminar y posteriormente el material y/o proceso, debido al flujo de información disponible en las diferentes etapas del diseño. Entre estos dos últimos, según Lovatt (Lovatt, 1998), el procedimiento más común de la literatura es seleccionar primero el material y posteriormente el proceso. Esta secuencia se justifica porque el material satisface ciertos requerimientos de diseño, mientras que el proceso afecta para la obtención de la forma y el material.

La fuerte dependencia entre el proceso y el material, y la similitud entre ambas áreas de selección, han propiciado que la selección de materiales y de procesos se traten de forma muy similar en la literatura. Hasta el punto que es común integrar ambos campos de selección en una misma herramienta de selección. Por este motivo, aunque este trabajo expone la selección de procesos, será usual mencionar la selección de materiales paralelamente.

Tradicionalmente, los diseñadores seleccionaban procesos y materiales basándose en su propia experiencia, o en la experiencia del ingeniero de fabricación. La falta de experiencia en otros procesos era la razón principal que no se consideraran otras alternativas de fabricación, a pesar que pudieran resultar más apropiadas para cumplir con unos determinados requerimientos (Gupta y Chen, 2003), o más económicas para la obtención del producto final (Zha, 2005).

Por este motivo, a finales de los años 80 y principios de los 90, el desarrollo de técnicas de ayuda para la toma de decisiones que contuvieran información sobre diversos procesos de fabricación (tradicionales y novedosos) para evaluar la viabilidad de cada proceso en relación a las necesidades de los diseñadores se convirtió en un amplio campo de investigación (Ishii et al., 1993; Gupta y Chen, 2003; Zha, 2005). Entre las primeras herramientas desarrolladas se destaca la herramienta de seleccionar materiales y procesos de Dargie et al. 1982 (Smith et al., 2003), el selector de procesos de forma neta o casi neta (*near-net or net-shape*) de Ishii (Ishii et al., 1991) y el selector de procesos y de máquinas de forja de Maloney (Maloney et al., 1989)

Actualmente, la amplia diversidad de procesos que se han venido utilizando en todo el mundo, la capacidad y características de cada uno de ellos, el rápido cambio que sufren las tecnologías de fabricación, el fuerte nivel competitivo al que están sometidos los productos y la dificultad de que los ingenieros conozcan todos los procesos de fabricación, continúan siendo las razones por las cuáles este campo de investigación continua estando muy vigente todavía (Gupta y Chen, 2003).

La selección de proceso de fabricación es un amplio campo de investigación en el que se distinguen dos líneas de investigación.

- Desde el punto de vista de la relación de la selección de procesos con el proceso de diseño se han desarrollado tres categorías de selección: la selección preliminar, la selección funcional y la selección basada en tareas de fabricación (Ashby et al., 2004), Figura 2-13. Cada una de estas categorías se ha establecido en relación con la información disponible de diseño, o lo que es lo mismo en correspondencia con la fase del diseño en la que pueden realizar la selección (Ishii et al., 1991; Lovatt, 1998; Ashby et al., 2004).

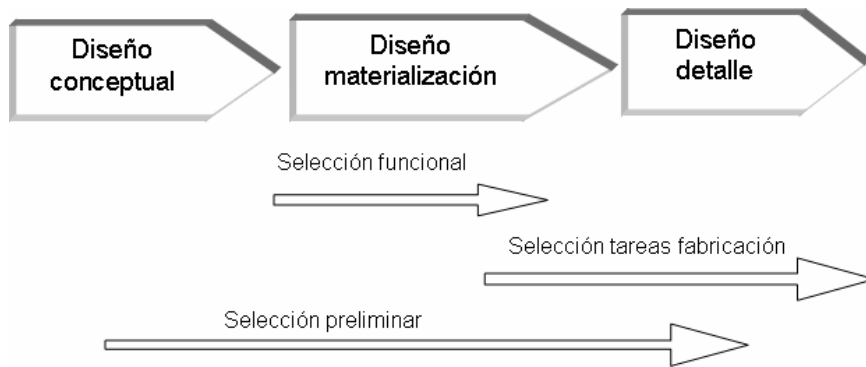


Figura 2-13: Categorías de selección en la selección de procesos, según (Lovatt, 1998)

- Desde el punto de vista del procedimiento que debe seguir el ingeniero para hacer la selección se han desarrollado tres estrategias de selección: la estrategia de búsqueda libre, la estrategia de cuestionario y la estrategia de razonamiento inductivo y analógico (Ashby et al., 2004).

A continuación se exponen las diferentes categorías y estrategias desarrolladas en la selección de procesos de fabricación, donde se incluyen los trabajos más relevantes de este campo de investigación.

2.3.1.1. Categorías en la selección de procesos

Las categorías de selección de procesos son los diferentes niveles de selección que se han establecido para seleccionar procesos en concordancia con la información de diseño disponible en cada momento. De modo que, cuando se disponga de poca información se pueda hacer una selección de procesos más general, mientras que cuando se disponga de información más detallada se pueda hacer una selección más refinada.

Desde el punto de vista de la selección de procesos, los procesos de fabricación se seleccionan para productos o piezas que se desarrollan en la fase de diseño (Feng y Song, 2000). Así pues, la información de diseño disponible es el punto de partida para la selección de procesos fabricación. Desde el punto de vista del proceso de diseño, la información disponible de diseño evoluciona durante las diferentes fases del mismo, de menor a mayor grado de detalle. Por lo tanto la selección de procesos tiene que ser coherente con la evolución de dicha información (Ishii et al., 1993; Lovatt, 1998).

Teniendo en cuenta que los procesos se seleccionan en base a la información de diseño disponible y que la información de diseño evoluciona se han definido las categorías de selección (Ishii et al., 1993; Lovatt, 1998; Ashby et al., 2004). Las categorías de selección representan las diferentes aproximaciones que se han desarrollado para ayudar al diseñador a afrontar el problema de elegir el proceso adecuado en cada fase del diseño (Lovatt, 1998). Para seleccionar procesos se han definido tres categorías diferentes (Ishii et al., 1993; Lovatt, 1998): selección preliminar, selección funcional y selección basada en tareas de fabricación (Figura 2-13)

a. Selección preliminar.

La selección preliminar es la primera aproximación en la selección de los procesos de fabricación. La selección preliminar se ha desarrollado para ser aplicable en la fase de diseño conceptual; en la cual una idea aproximada de las propiedades de producto (forma y material), y ciertos requerimientos y restricciones de producto, como volumen de producción o peso límite del producto, ya se han definido (Lovatt, 1998). El objetivo de la selección preliminar es evaluar rápidamente todos los procesos para eliminar aquellos procesos que son claramente técnica y económicamente no viables.

Para esta aproximación, la información disponible de diseño es conceptual y poco detallada, por consiguiente no se requieren información de los procesos de fabricación especialmente detallada o precisa para hacer la selección. Normalmente una comparación analítica entre los requerimientos de producto y las propiedades de diseño con la capacidad de cada proceso de fabricación es suficiente para hacer esta selección. Por ejemplo comparar la rugosidad que se requiere de un diseño con el rango de rugosidad que generalmente los procesos son capaces de procesar.

Dentro de esta aproximación se han desarrollado gran parte de los trabajos relacionados con la selección de procesos de fabricación. Entre ellos se destacan: (Giachetti, 1997; Esawi y Asbhy, 1998; Gupta y Chen, 2003; Swift, 2003; Zha, 2005) para la selección de todos los procesos de fabricación, (Ishii et al., 1993; Ferrer et al., 2004) para la selección de procesos de forma neta o casi neta (*near-netor net-shape*), (Darwish y El-Tamimi, 1996; Er y Dias, 2000) para la selección de procesos de fundición.

b. Selección funcional

La selección funcional se ha desarrollado para ser aplicable tras haber obtenido un conjunto de procesos viables en la selección preliminar. Partiendo de dichos procesos viables, el objetivo de la selección funcional es elegir aquellos procesos que satisfagan las funciones requeridas por el producto. En este tipo de selección se plantea la función del componente como variable clave en la decisión de seleccionar los procesos.

Algunos procesos de fabricación pueden influenciar directamente sobre la función del producto. Por ejemplo, las tensiones residuales o los cambios en la microestructura del material que generan algunos procesos pueden afectar sobre las propiedades mecánicas del producto y por lo tanto al cumplimiento de la función para el cual es diseñado. Es evidente que hay procesos que afectan más directamente a la función que otros, por ejemplo los procesos de unión (soldadura o unión adhesiva) son un ejemplo claro (LeBacq et al., 2002). Si un componente tiene que ser aislante, cierto tipo de uniones garantizarán mejor dicha función que otras.

En la selección funcional, la información de partida de diseño es cualitativa así como también la información que se requiere del proceso de fabricación. Por lo tanto, según LeBacq (LeBacq et al., 2002), para este tipo de selección no es conveniente utilizar un procedimiento de selección analítico, sino que en su lugar es mejor utilizar aproximaciones más cualitativas, como por ejemplo el uso de cuestionarios o estudio de casos que se ha explicado en el siguiente apartado 2.3.1.2

Realzando la afirmación de Brechet (Brechet et al., 2001), pocas son las investigaciones que se han llevado a cabo en la selección funcional de los procesos de fabricación. Concretamente, las investigaciones realizadas por LeBacq (LeBacq et al., 2002) son las más relevantes. Sin embargo, la selección basada en aspectos funcionales de diseño está más avanzada para la selección de materiales (Landru et al., 2002a; Landru et al., 2002b; Salimon et al., 2004)

c. Selección basada en tareas de fabricación

La selección basada en tareas de fabricación es aplicable en la fase de diseño de materialización, donde la información disponible de diseño, desde el punto de vista de las propiedades de material y de forma, es más detallada y precisa. Partiendo de esta información disponible, junto con el resultado del proceso de selección anterior, se puede llevar a cabo una selección más refinada y optimizada (Lovatt, 1998; Shercliff y Lovatt, 2001). Esto significa, especificar más detalladamente el proceso de fabricación viable para un producto, pero considerando la combinación entre el material y el proceso más adecuada para satisfacer las necesidades del diseño, maximizando su comportamiento y minimizando su coste (Ashby et al., 2004).

La selección basada en tareas de fabricación tiene el objetivo de seleccionar procesos y materiales, de forma más detallada, dentro de una combinación de material y proceso determinada. Esta combinación de material y proceso se define como las tareas de fabricación (Lovatt, 1998).

Las tareas de fabricación son la combinación de procesos de fabricación con familias de materiales, por ejemplo: fundición de aluminio, extrusión de aluminio, corte de acero o soldadura de inoxidable (Shercliff y Lovatt, 2001). Para un diseño, cuya combinación de material y proceso viable fuera fundición de aluminio, esta selección permitiría elegir si es mejor fabricar la pieza en fundición de molde de arena o en molde permanente o en molde a presión. Aunque también se consideraría la compatibilidad de cada proceso con las diferentes aleaciones de aluminio existentes (Lovatt, 1998), Tabla 2-7.

En función de las propiedades de diseño que se pretendan conseguir la combinación de las propiedades de los procesos con las propiedades del material hacen que algunos procesos sean más compatibles con un tipo de material que con otros. Una metodología para determinar las correlaciones y dependencias entre las propiedades de los procesos y las propiedades de los materiales de cada tarea de fabricación se expone en (Lovatt, 1998). El resultado de aplicar esta metodología a diferentes combinaciones de material y proceso, permite hacer una selección de procesos más óptima en la fase de diseño de materialización. Aunque esta correlación no tenga una aplicación generalizada, pues es específica para tareas de fabricación concretas, será clave para poder hacer una optimizada selección de proceso en esta fase del diseño (Lovatt, 1998).

		Fundición en molde de arena	Fundición en molde permanente	Fundición en molde a presión
Compatibilidad con clases de aleaciones	EN AC-51xxx	3	3	3
	EN AC-41xxx	3	3	1
	EN AC-42xxx	3	3	1
	EN AC-21xxx	3	3	1
	EN AC-47xxx	2	2	2
	Rango de dimensiones (mm)	10-1500	10-500	15-800
	Rango de mas (kg)	0,1-200	0,1-30	0,05-10
	Complejidad	5	3	4

Tabla 2-7: Compatibilidad entre procesos de fundición con diferentes aleaciones de aluminio (fuente de: (Lovatt, 1998))

Tras el análisis de las diferentes categorías de selección que se han desarrollado para seleccionar procesos, se constata que cada una ellas considera la selección del proceso de fabricación en una fase diferente del proceso diseño. Por ello, en cada categoría, los procesos de fabricación tienen que ser definidos en base a la información de diseño disponible en cada fase del mismo. Esto significa que cuanto más conceptual sea el diseño, más general podrá ser la información de proceso para la selección, pero cuanto más detallado sea el diseño, más detallada tendrá que ser la información del proceso que sirva para seleccionar.

Estas tres categorías se han tratado de integrar en un único un modelo integrado para la selección de procesos por parte de Ishii (Ishii et al., 1993). Pero hasta el momento, este modelo no ha sido suficientemente desarrollado para comprobar la efectividad de esta integración para un amplio rango de problemas de selección (Lovatt, 1998). Por ello es más útil considerar las diferentes áreas de selección por separado (Lovatt, 1998)

2.3.1.2. Estrategias en la selección de procesos

La estrategia de selección es el procedimiento que deberá seguir el ingeniero para seleccionar los procesos de fabricación. La estrategia de selección tiene como objetivo convertir un conjunto de entradas en salidas. Las entradas corresponden con la información de diseño disponible, que incluye funciones, requerimientos, restricciones y propiedades del producto. Las salidas resultarán ser la selección procesos que son viables para dichas entradas (Ashby et al., 2004). En el caso de aplicaciones informáticas de ayuda para la selección de procesos, la estrategia de selección es definida por el desarrollador de dicha herramienta (Ashby et al., 2004).

Como se mencionó anteriormente hay tres tipos de estrategias para hacer la selección (Ashby et al., 2004): la estrategia de búsqueda libre, la estrategia de cuestionario y la estrategia de razonamiento inductivo y analógico.

Estas estrategias también son aplicables a la selección de materiales (Ashby et al., 2004) y cada una de ellas puede ser utilizada como procedimiento de selección en cualquiera de las categorías expuestas en el apartado anterior.

a. Estrategia de búsqueda libre

La estrategia de búsqueda libre permite realizar la selección de procesos mediante la comparación de la información de diseño disponible con los atributos de los procesos de fabricación.

Los atributos de los procesos de fabricación son el conjunto de propiedades y restricciones que describen un proceso de fabricación para poder hacer comparaciones directas y objetivas entre los procesos de fabricación y la información disponible de diseño (Lovatt y Shercliff, 1998b). Por ejemplo, el rango de rugosidad que un proceso es capaz de proporcionar en una pieza determinada.

En esta estrategia, el procedimiento para seleccionar los procesos se realiza en tres fases (Ashby et al., 2004): exploración o discriminación (*screening*), graduación (*ranking*) y captura de información adicional.

- En la fase de exploración se compara la información de diseño con los atributos de los procesos de fabricación, con el objetivo de eliminar los procesos que no son compatibles con la información de diseño especificada. Por ejemplo, la comparación entre la tolerancia que se requiere en un determinado diseño con el rango de tolerancia que los procesos son capaces de conseguir. El resultado es el conjunto de procesos viables.
- En la fase de graduación se ordenan los procesos que son viables, es decir las soluciones admisibles. Esta graduación se obtiene valorando los procesos en función de objetivos económicos, mediante una estimación de costes fabricación, o en función de otros objetivos que pueden resultar relevantes para el diseñador o para la empresa. El resultado es una lista ordenada de procesos viables.
- En la fase de captura de información adicional se obtiene información adicional sobre los procesos de posición más elevada en la graduación que puede resultar útil para asistir en las decisiones de diseño

Entre los trabajos realizados en esta estrategia se destacan: (Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Esawi y Asbhy, 1998; Gupta y Chen, 2003; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004; Zha, 2005).

La estrategia de búsqueda libre es un método de selección rápido y eficiente, que puede ser aplicado en una amplia variedad de diseños, y tiene la habilidad de revelar soluciones nuevas e innovadoras que también cumplen con los requerimientos de diseño (Ashby et al., 2004). Motivo por el cual, es ampliamente utilizada en la selección de procesos de fabricación, como se expone en el apartado 2.3.1.3. El inconveniente principal es que se necesita entradas detalladas y precisas para poder comparar de forma directa y objetiva la capacidad de los procesos con la información disponible de diseño. Este aspecto no resulta

fácil, considerando la gran diversidad de información asociada a los procesos, el elevado grado de complejidad en la obtención de la misma y la complejidad del proceso de diseño.

b. Estrategia de cuestionario

La estrategia de cuestionario permite hacer la selección de procesos y/o materiales mediante unos cuestionarios que se plantean al diseñador para ayudarlo durante el proceso de selección. Los cuestionarios dirigen al diseñador mediante un sistema estructurado de decisiones, incorporándole experiencia y conocimiento sobre los procesos de fabricación para compensar la carencia que el diseñador o el usuario puede tener de ellos. Dependiendo de las respuestas que proporciona el diseñador para cada cuestión o conjunto de ellas, los procesos y materiales se van discriminando. Un ejemplo de una cuestión para seleccionar procesos podría ser: la pieza que se está diseñando tiene la sección longitudinal: ¿constante o irregular? Dependiendo de la respuesta proporcionada por el diseñador, procesos como la extrusión podrían quedar eliminados.

Para poder llevar a cabo esta estrategia se requiere de la realización de cuestionarios que guíen en la selección de procesos. Los cuestionarios se construyen documentando de forma explícita y clara los pasos que siguen los expertos durante el proceso de selección. Para ello, puede resultar útil un proceso escalonado de preguntas, respuestas y nuevas preguntas en base a dichas respuestas. Al mismo tiempo que los expertos proporcionan información para la selección, también proporcionan un sistema de ponderaciones para obtener la graduación de los procesos que son seleccionados.

Entre los trabajos desarrollados en esta estrategia se destacan los trabajos de (Lovatt et al., 1999; Er y Dias, 2000)

La estrategia basada en cuestionario se fundamenta en la experiencia, y por ello se considera un procedimiento muy fiable. Además, es un método de selección que mediante preguntas claras y respuestas concretas se puede obtener la solución, por ejemplo respuestas del tipo: si/no o valores numéricos. Es un método de fácil uso y eficaz. Pese a ello, según (Ashby et al., 2004) no es un proceso innovador, pues la selección emerge del conocimiento de los expertos, y en el caso de nuevos procesos o materiales la falta de expertos limitaría el proceso de selección. Además, aunque ofrece grandes soluciones, es un método desarrollo difícil, costoso, largo de crear y de mantener.

c. Estrategia de razonamiento inductivo y analógico

La estrategia de razonamiento inductivo y analógico permite obtener los materiales y/o procesos que pueden ser viables para un diseño dado mediante la comparación o analogía con casos que ya se han resuelto exitosamente con anterioridad. Esta estrategia permite obtener soluciones potenciales de materiales y de procesos para un nuevo diseño, comparando los requerimientos de un nuevo diseño con los requerimientos de diseños ya resueltos.

Para llevar a cabo esta estrategia se requiere de la definición de una librería que contenga: los casos resueltos y los índices de búsqueda de la librería (Ashby et al., 2004).

- Los casos resueltos contienen información relacionada con el problema impulsor del diseño al cual representan, los requerimientos y las restricciones del mismo, la solución adoptada (de materiales o de procesos) y una valoración del grado de éxito de dicha solución.
- Los índices de búsqueda son las palabras claves que definen y organizan la librería, y que permiten hacer la búsqueda para nuevos casos. Si las palabras claves son muy específicas el sistema será demasiado rígido y sólo se encontrarán casos que cumplan con exactitud. De lo contrario, si son excesivamente abstractas serán difíciles de entender para el usuario, excepto para el usuario que las creó. Un ejemplo de ello sería el caso del rediseño de un enchufe para que la gente mayor pueda enchufarlo con más facilidad, expuesto en (Ashby et al., 2004). En este ejemplo elegir el término enchufe como palabra clave es demasiado rígido, ya que pueden existir otros componentes que también tengan que ser rediseñados para ser adaptados a la gente mayor, y que por ello cumplan con características comunes. Por lo tanto en este caso, una palabra clave suficientemente abstracta y general sería “diseñar para gente mayor”. En este ejemplo, tomando la solución del caso del enchufe se podrían obtener materiales, diseños y procesos más adaptados para la gente mayor.

Cuando la librería ya está definida, el procedimiento para seleccionar con esta estrategia consiste en: analizar el nuevo problema, identificar las características principales, buscar en la librería de casos características comunes con el problema planteado, recopilar los materiales y procesos de los casos que se han encontrado, y por último enfrentar el problema y solucionarlo mediante la adaptación y combinación de los elementos de los casos encontrados. Entre los trabajos que se han realizado bajo esta estrategia se destaca (Lenau, 2002)

La estrategia de razonamiento inductivo y analógico es un método que conduce al diseñador hacia posibles soluciones viables. Esta estrategia proporciona una amplia variedad de soluciones que pueden resultar muy innovadoras. No obstante, aunque ofrece grandes soluciones, es necesario reforzar dichas soluciones mediante métodos que las validen más firmemente (Ashby et al., 2004). La captura y organización de la información para el desarrollo de la librería no es fácil. Y al igual que la estrategia anterior, el desarrollo de este método es difícil de crear y de mantener.

Como se ha visto a lo largo de esta sección, cada estrategia tiene sus ventajas e inconvenientes, y hay espacio para las tres, ya sea usadas juntas o por separado (Ashby et al., 2004). En cambio, de todas estas estrategias las que más han evolucionado, desde el punto de vista de la investigación, es la estrategia de búsqueda libre. Por este motivo se expone de forma más detallada en el siguiente apartado.

2.3.1.3. Estrategia de búsqueda libre

Esta estrategia es uno de los procedimientos que se han desarrollado para seleccionar procesos de fabricación. Este procedimiento se basa en tres principios fundamentales: los atributos de los procesos de fabricación, la técnica de exploración o discriminación y la técnica de graduación.

Como se observa en la Figura 2-14, los atributos de los proceso de fabricación permiten hacer comparaciones directas y objetivas entre los procesos de fabricación y la información disponible de diseño. La técnica de discriminación permite eliminar los procesos que no son técnicamente viables. La técnica de graduación permite ordenar los procesos viables según los criterios establecidos por el diseñador (Lovatt y Shercliff, 1998b).

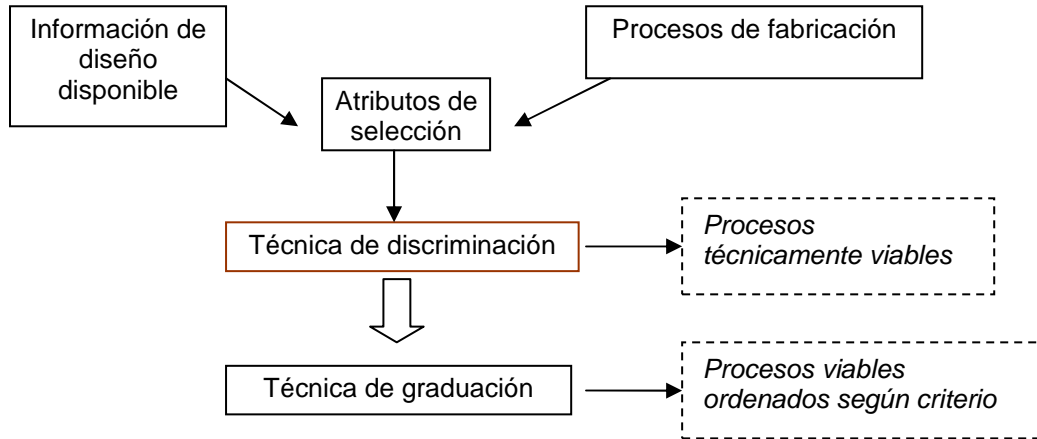


Figura 2-14: Elementos principales en la estrategia de búsqueda libre

A continuación se expone de forma más detallada los diferentes atributos de los procesos de fabricación que han definido para la selección de procesos de fabricación, seguido de las diferentes técnicas de discriminación y de graduación propuestas.

a. Atributos de los procesos de fabricación

La estrategia de búsqueda libre permite seleccionar los procesos comparando la información de diseño disponible con los atributos de los procesos de fabricación.

Los atributos de los procesos de fabricación son el conjunto de propiedades y restricciones que describen un proceso de fabricación para poder hacer comparaciones directas y objetivas entre los procesos de fabricación y los requerimientos de diseño (Lovatt y Shercliff, 1998b). Estos atributos son comunes a todos los procesos y por ello permiten discriminar entre todos ellos. Por ejemplo el rango de tolerancia que un proceso es capaz de proporcionar para una pieza determinada.

Los atributos de los procesos forman parte de la capacidad de un proceso para obtener un determinado diseño. Pero cuando se habla de la capacidad de un proceso (*process capability*), en su sentido más genérico, este término es mucho más amplio.

La capacidad de un proceso de fabricación es el conjunto de propiedades que representan las restricciones y habilidades (aptitudes) que tiene un proceso de fabricación para fabricar un determinado diseño. También se podrían definir como el conjunto de requerimientos y restricciones de cada uno de los procesos de fabricación para fabricar un diseño determinado. La capacidad de un proceso incluye los atributos de los procesos, pero

también otras propiedades más específicas de cada proceso que también pueden afectar para obtener un diseño dado. Por ejemplo el ángulo de desmoldeo que se precisa para las piezas de forja.

Los atributos de los procesos, según la naturaleza de los datos (Ashby et al., 2004), se pueden clasificar en atributos cuantitativos o numéricos, y en atributos cualitativos o no numéricos.

Atributos cuantitativos o numéricos

Los atributos cuantitativos o numéricos son las propiedades de los procesos que se pueden caracterizar mediante un valor o un rango de valores numéricos. Normalmente todos los atributos numéricos de los procesos se definen mediante rangos. Por ejemplo, el proceso de forja con matriz cerrada puede proporcionar unos valores de rugosidad comprendidos dentro del rango [3.2-12.5] μm

Según la literatura, los rangos de los atributos numéricos pueden ser de dos tipos: el rango normal u optimista y el rango extremo o pesimista. El rango normal es el conjunto de valores de los atributos numéricos que el proceso es capaz de obtener normalmente. Según Ishii (Ishii et al., 1993) los rangos normales deben ser aquellos en los cuáles cada proceso puede ser empleado más económicamente. El rango extremo es el conjunto de valores de los atributos numéricos que el proceso es capaz de obtener en condiciones no habituales o especiales. El rango extremo corresponde a valores de aplicaciones atípicas de los procesos. Por ejemplo el rango normal de rugosidad que se puede obtener con el proceso de fundición en molde en la mayoría de aplicaciones es entre 0.8 y 1.6 μm , mientras que en aplicaciones más específicas, usando máquinas o herramientas especiales, este proceso es capaz de producir valores inferiores a 0.8 μm (Giachetti, 1997).

El rango normal de los atributos numéricos acostumbra a ser definido por la mayoría de los investigadores que tratan la selección de procesos de fabricación (Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Feng y Zhang, 1999; Esawi y Ashby, 2000; Swift, 2003), mientras que el rango extremo es menos considerado por las investigaciones de selección (Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 2000).

La Tabla 2-8 muestra una relación de los atributos numéricos más relevantes de la selección de procesos de fabricación, junto con los autores que los consideran y el rango en el que definen los valores de los atributos.

Atributos	Detalle de los atributos	Autor	Rango de atributo
Dimensiones generales	Longitud	(Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Ferrer et al., 2004)	Rango normal
	Alto		Rango normal
	Ancho		Rango normal
	Dimensión máxima	(Feng y Zhang, 1999; Er y Dias, 2000; Esawi y Ashby, 2000; Swift, 2003; Zha, 2005)	Rango normal
Peso		(Ishii et al., 1993; Er y Dias, 2000; Swift, 2003)	Rango normal
		(Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal Rango extremo
Tolerancias		(Ishii et al., 1993; Feng y Zhang, 1999; Er y Dias, 2000; Ferrer et al., 2004; Zha, 2005)	Rango normal
		(Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal Rango extremo
		(Swift, 2003)	Rango normal Rango extremo
Acabado superficial		(Ishii et al., 1993; Feng y Zhang, 1999; Er y Dias, 2000; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004; Zha, 2005)	Rango normal
		(Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal Rango extremo
Sección de pared		(Er y Dias, 2000; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004)	Rango normal
		(Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal Rango extremo
Otros atributos	Diámetro mínimo agujero	(Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal
	Radio mínimo de esquina	(Esawi y Ashby, 2000; Ferrer et al., 2004)	Rango normal
	Ratio de aspecto	(Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal
	Ratio de sección adyacente	(Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal
	Factor de calidad	(Esawi y Ashby, 2000)	Rango normal
Atributos de producción	Volumen producción	(Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 1998; Er y Dias, 2000; Feng y Song, 2000; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004; Zha, 2005)	Rango normal
	Tiempo mercado	(Giachetti, 1997; Zha, 2005)	Rango normal
	Coste de producción	(Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Zha, 2005)	Rango normal

Tabla 2-8: Atributos cuantitativos para la selección de procesos y autores asociados.

- Las dimensiones generales representan las dimensiones límites que se pueden procesar de una pieza mediante un proceso determinado. En algunas de las investigaciones las dimensiones generales incluyen la longitud, alto y ancho de la pieza (Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Ferrer et al., 2004), mientras que otras investigaciones consideran que los procesos sólo están limitados con la dimensión máxima de la pieza (Feng y Zhang, 1999; Er y Dias, 2000; Esawi y Ashby, 2000; Zha, 2005).
- El peso de la pieza a procesar es un atributo clave para caracterizar los procesos de fabricación para la selección. Es evidente que el peso límite del proceso depende de las dimensiones de la pieza, la densidad del material y de la capacidad dimensional de la máquina; pero como se ha comentado anteriormente, hay que considerar el rango de valores del atributo peso que es económicamente viable en el entorno industrial para cada proceso (Ishii et al., 1993).
- La tolerancia define la capacidad de los procesos para proporcionar precisión geométrica o dimensional en una pieza determinada (Swift, 2003). La mayoría de los autores definen este atributo en forma de rango numérico. Sin embargo, considerando la relación ampliamente conocida entre la tolerancia y las dimensiones de las piezas, Swift (Swift, 2003) define unas representaciones gráficas bastante completas en las que se puede obtener de rango de tolerancia normal, extremo e inviable en función de las dimensiones de la pieza, para cada uno de los procesos.
- El acabado superficial define la capacidad de los procesos para proporcionar la calidad superficial de una pieza determinada (Swift, 2003).
- La sección de pared indica el espesor límite que se puede conseguir en una pieza mediante un proceso determinado. (Esawi y Ashby, 2000) y (Giachetti, 1997) diferencian entre la sección mínima y la sección máxima que es capaz de fabricar. Mientras que en las otras investigaciones, la sección máxima acostumbra a ser coincidente con las dimensiones máximas que puede obtener con el proceso.
- Existen otros atributos cuantitativos, de uso menos común en la literatura de la selección de procesos. Entre ellos destacan: el diámetro mínimo de agujero, el radio mínimo de esquina en la pieza, el ratio de aspecto, el ratio de sección adyacente y el factor de calidad (Esawi y Ashby, 2000).
- Los atributos de producción incluyen las propiedades del proceso que tienen relación con las propiedades de producción del producto. Entre ellas se destacan: el volumen de producción dentro del cual un proceso es económicamente viable, el tiempo de vida del producto en el mercado y el coste estimado de producción. Los atributos de producción son propiedades claves que pueden ser decisivas en la selección. El volumen de producción es un claro ejemplo de atributo usado por la mayoría de investigadores (Ishii et al., 1993; Giachetti, 1997; Esawi y Ashby, 1998; Er y Dias, 2000; Feng y Song, 2000; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004).

Atributos cualitativos o no numéricos

Los atributos cualitativos o no numéricos son las propiedades de los procesos que se pueden caracterizar mediante valores no cuantificables. Los atributos cualitativos pueden ser de tres tipos diferentes (Ashby et al., 2004): de tipo booleano, de tipo graduación y tipo de jerarquía o clase.

- Los atributos de tipo booleano son aquellos que pueden tomar dos valores que son excluyentes entre ellos, por ejemplo si/no. Este tipo de atributos se emplean para especificar la existencia de característica de diseño en la pieza, por ejemplo la presencia de agujeros o recortes en la pieza (Giachetti, 1997; Ferrer et al., 2004), o también para especificar si la sección es constante o irregular (Ishii et al., 1993; Ferrer et al., 2004).
- Los atributos de tipo graduación son aquellos que pueden tomar valores dentro de una secuencia ordenada o graduada, por ejemplo: excelente, bueno, medio, malo. Este tipo de atributo se pueden emplear para valorar y comparar atributos de forma relativa entre diferentes procesos, como por ejemplo el coste de herramientas y utillajes, el coste de inversión, el coste de procesado o coste de material desechado (Darwish y El-Tamimi, 1996)
- Los atributos de tipo de jerarquía o clase son aquellos que toman valores dentro de una clasificación previamente definida. Por ejemplo el atributo de características de diseño tomaría valores respecto a una clasificación de características de diseño o el atributo de material tomaría valores respecto a una clasificación de materiales.

Dada la importancia del material y de la forma en la selección de procesos, se destacan principalmente los atributos de material y de forma como atributos cualitativos más relevantes. Por este motivo se explicará brevemente cada uno de ellos, así como también algunas de las clasificaciones utilizadas para definir su valor.

- Atributo de material

Generalmente, en la selección de procesos, el material se considera un atributo cualitativo de tipo jerárquico. La clasificación de materiales utilizada para definir los tipos de materiales que cada proceso es capaz de procesar es bastante convencional entre los diferentes autores de la selección de procesos (Giachetti, 1997; Esawi y Asbhy, 1998; Lovatt, 1998; Swift, 2003; Ferrer et al., 2004). Un ejemplo de ello se expone en la Figura 2-15.

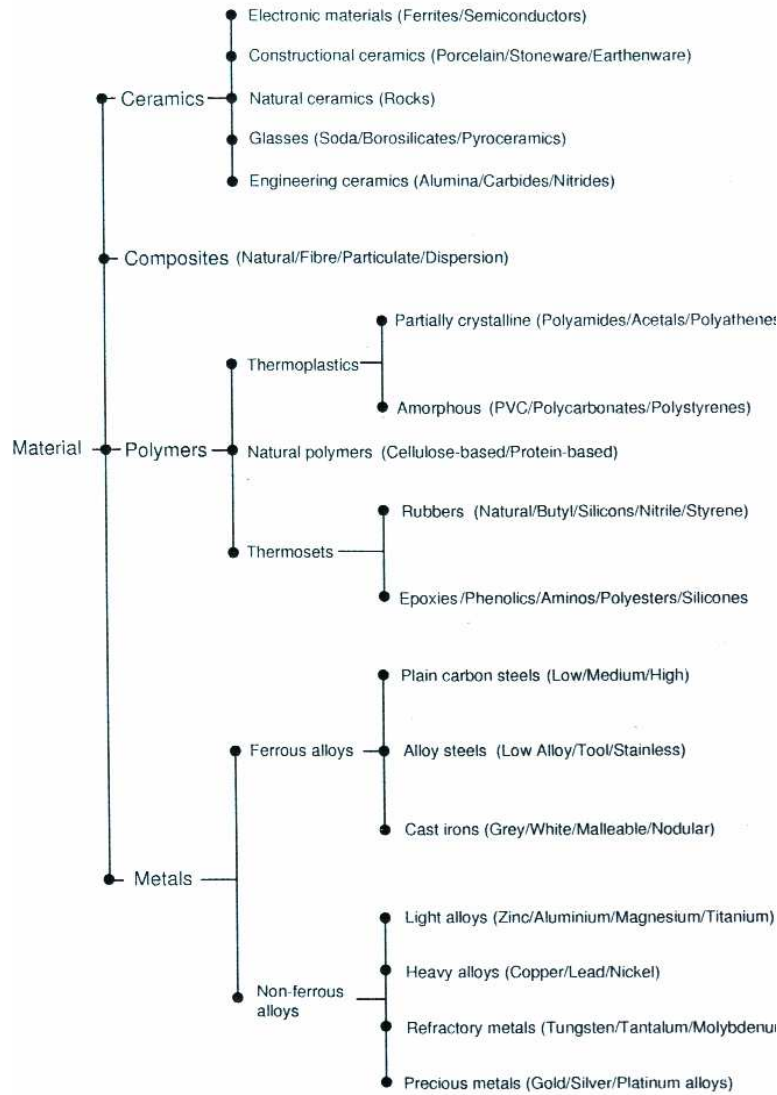


Figura 2-15: Clasificación de los materiales para la selección de procesos de fabricación (fuente de: (Swift, 2003).)

Aunque generalmente el material se considera un atributo cualitativo, la definición del atributo de material como una variable cualitativa también es utilizada en la selección de procesos (Ishii et al., 1993). En este caso el material se define desde el punto de vista de sus propiedades: tensión, dureza, resistencia o densidad (Ishii et al., 1993)

- Atributo de forma

La forma también se considera un atributo cualitativo de tipo jerárquico, y al igual que el material es un elemento clave en la definición de la capacidad de los procesos de fabricación para la selección. La clasificación de formas que se utiliza para definir

las diferentes formas que cada proceso es capaz de procesar difiere entre los diferentes autores que tratan la selección de procesos.

- Feng (Feng y Zhang, 1999; Feng y Song, 2000) considera que la capacidad de los procesos para obtener una forma debe definirse en relación a los modelos geométricos y las características geométricas en que se basan los sistemas CAD. Esto incluye modelos geométricos como pieza de revolución, pieza prismática o cilindro con agujero, y características de diseño como agujero, cajera, entrecaras o rosca.
- Esawi (Esawi y Asbhy, 1998), Swift (Swift, 2003) e Ishii (Ishii et al., 1993) proponen una clasificación estructurada de las formas que pueden obtener los procesos de fabricación. Estas clasificaciones están más definidas desde el punto de vista de la fabricación, que desde el punto de vista de diseño. Esto significa que a parte de considerar los modelos geométricos y las características geométricas en que se basan los sistemas CAD, también tienen en cuenta propiedades de forma relevantes para los procesos de fabricación como: tipo de sección (constante o irregular) o distribución y posición de las características de diseño.

La clasificación de forma propuesta por (Ishii et al., 1993) esta focalizada en los procesos de forma neta o caso neta (*near-net or net-shape*), y por ello se consideran características de forma muy específicas para este tipo de procesos. Las clasificaciones de (Esawi y Asbhy, 1998) y (Swift, 2003) se definen desde una perspectiva más generalizada, es decir ambas clasificaciones pueden representar ampliamente la capacidad, en relación a la forma, de todos los procesos de fabricación. En la Figura 2-16 y la Figura 2-17 se muestra un esquema de cada una de estas clasificaciones.

Comparando las clasificaciones expuestas en la Figura 2-16 y la Figura 2-17 se observa que se puede establecer una cierta equivalencia entre ellas. Los niveles 1, 2 y 3 de la clase A y B de la clasificación de Swift (Swift, 2003) son equivalentes al conjunto de formas prismáticas de la clasificación de Esawi (Esawi y Asbhy, 1998). Mientras que los niveles 4 y 5 de estas mismas clases son equivalentes al conjunto de formas 3D. Las formas de la clase C de la clasificación de Swift (Swift, 2003) son equivalentes al conjunto de formas de lámina de metal de la clasificación de Esawi (Esawi y Asbhy, 1998).

Aunque en esta sección se citan algunas de las clasificaciones de la forma utilizadas en las investigaciones de la selección de procesos, existen otras clasificaciones de formas que también pueden considerarse en este campo de investigación. Entre ellas se incluyen las clasificaciones propuestas por Optiz, para las formas de mecanizado y las de lámina de metal, y la clasificación de formas de piezas de forja propuesta en (Committee under ASM direction, 1988).

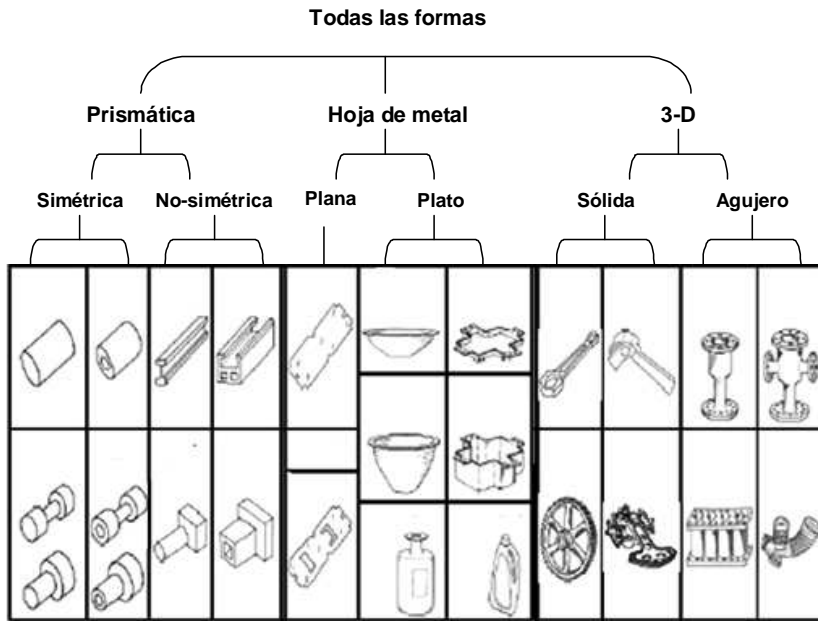


Figura 2-16: Clasificación de forma propuesta por Esawi & Lovatt (fuente de: (Esawi y Ashby, 2000))

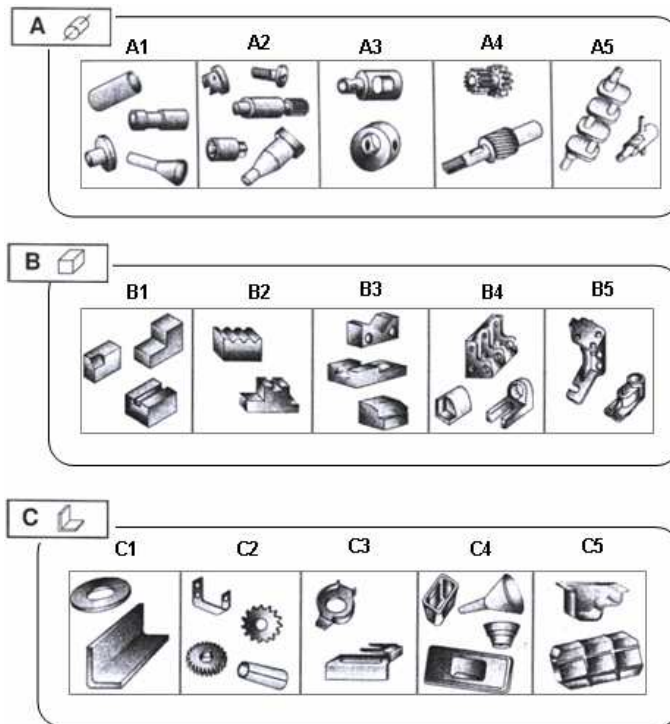


Figura 2-17: Clasificación de forma propuesta por Swift (fuente de:(Swift, 2003))

b. Técnicas de discriminación

La técnica de discriminación es el conjunto de reglas que relacionan la información de diseño disponible con los atributos de selección, con la finalidad de seleccionar aquellos procesos que son técnicamente viables (Lovatt y Shercliff, 1998a; Lovatt y Shercliff, 1998b). O dicho de otro modo, los métodos de discriminación son las reglas que se definen para la selección de procesos.

En general, todos los autores que trabajan en la selección de procesos definen un método de discriminación similar. Este método consiste en testear cada requerimiento de la información de diseño disponible con el atributo de los procesos de fabricación correspondientes. El resultado de cada testeo es aceptable cuando el valor o el rango de valores del requerimiento de diseño cae dentro del rango de valores del atributo de los procesos, ya sea para los atributos cuantitativos o cualitativos. El proceso de fabricación será válido siempre y cuando todos los requerimientos testeados cumplan. Sólo que uno de ellos quede fuera del rango, el proceso ya no es válido para fabricar dicho diseño.

c. Técnicas de graduación

La técnica de graduación es el método que permite obtener una ordenación de los procesos que son técnicamente viables y que permite decidir los procesos que son más válidos en base a los objetivos establecidos por el diseñador o por la empresa. En la literatura analizada se ha detectado dos tipos de técnicas de graduación: las técnicas de graduación basadas en parámetros técnicos y las técnicas de graduación basadas en estimación de costes.

Técnicas de graduación basados en parámetros técnicos

Las técnicas de graduación basadas en parámetros técnicos permiten ordenar los procesos según las “desviaciones” que existen entre los requerimientos de diseño y el rango de los atributos de los procesos de fabricación. La importancia considerada por el diseñador sobre cada requerimiento también puede intervenir para modificar dicha graduación.

Dentro de este tipo de técnicas se destacan los trabajos realizados por Ishii (Ishii et al., 1991) y Giachetti (Giachetti, 1997). Veamos de forma sintetizada cada uno de ellos.

- La técnica de graduación de Ishii (Ishii et al., 1993) ordena los procesos según la compatibilidad de los requerimientos de producto con los atributos de los procesos de fabricación. Esta compatibilidad se asigna en función de la distancia del valor medio del rango del atributo del proceso y el valor del requerimiento de diseño. Por ejemplo, si el valor del requerimiento de diseño está cerca de la mediana del rango del atributo, la compatibilidad asignada será del 100%. Sin embargo, esta compatibilidad disminuye al aumentar la distancia respecto a dicha mediana.

Esta teoría se basa en el principio que para valores de requerimientos cercanos a la mediana del rango, los atributos de los procesos acostumbran a ser más usuales que en los rangos cercanos a los extremos. Pues los rangos extremos seguramente requerirán de mejores equipos y por lo tanto aumentarían los costes. El grado de compatibilidad final para cada proceso se obtiene mediante la ponderación de los

requerimientos y la consecuente mediana geométrica de todas las compatibilidades en una compatibilidad final.

- La técnica de graduación de Giachetti (Giachetti, 1997) también ordena los procesos según la compatibilidad de los requerimientos de diseño respecto a los atributos de los procesos de fabricación. Pero en este caso se considera que la compatibilidad sólo disminuye cuando el requerimiento cae dentro del rango extremo del atributo del proceso.

En esta investigación, los procesos se caracterizan según atributos de rango de valores normales y atributos de rangos de valores extremos. Cada atributo de procesos se modeliza mediante una representación gráfica, Figura 2-18. En esta representación, en el eje horizontal se representan los valores del rango para cada atributo de proceso; mientras que en el eje vertical se representa el grado de compatibilidad, el cual puede oscilar entre [0-1]

Considerando esta distinción, se establece que la compatibilidad entre un atributo de proceso y un determinado requerimiento de diseño es 0, cuando el requerimiento de diseño queda fuera del rango extremo; mientras que dicha compatibilidad es 1, cuando está incluido dentro del rango normal. Si el requerimiento de diseño está incluido en el intervalo que oscila entre los dos límites de los rangos, normal y extremo, se considera que la compatibilidad será un valor comprendido entre 0 y 1, Figura 2-18.



Figura 2-18: Representación de la compatibilidad entre un atributo de proceso y un requerimiento de diseño, según (Giachetti, 1997)

Para agregar todos los ratios individuales en un único ratio se utiliza un promedio geométrico (Giachetti, 1997). Pero dado que los requerimientos de diseño no tienen la misma importancia, el usuario puede ponderar la importancia de los requerimientos y por lo tanto orientar la selección en base a sus propios criterios.

Técnicas de graduación basadas en estimación de costes

Las técnicas de graduación basadas en estimación de costes permiten ordenar los procesos según una estimación económica para cada proceso de fabricación.

En la literatura se definen tres modelos de costes: el modelo de Esawi & Lovatt (Esawi y Ashby, 2003), el modelo de Feng (Feng y Song, 2000) y el modelo de Swift (Swift, 2003)

- La técnica de graduación desarrollada por Esawi & Lovatt (Esawi y Ashby, 2000; Esawi y Ashby, 2003) se compone de tres términos para estimar el coste de cada diseño, ecuación (2-1). En el primer término incluye los costes relacionados con el material y los consumibles necesarios por unidad de producto (C_w). Como costes de material se considera el coste del material de la pieza (C_m) y la fracción de material desechada (f). El segundo término incluye el coste de las herramientas y utillajes (C_T) en función del tamaño del lote (n). El último término, valora el capital amortizado de las instalaciones que se emplean para desarrollar el producto y otros gastos generales. Para esta valoración se incluye el índice de gastos generales (\dot{C}_L) y el ratio de producción (\dot{n})

$$C = \left[\frac{C_m}{1-f} + C_w \right] + \left[\frac{C_T}{n} \right] + \left[\frac{\dot{C}_L}{\dot{n}} \right] \tag{2-1}$$

- La técnica de graduación desarrollada por Feng (Feng y Zhang, 1999) se compone de cuatro términos para estimar el coste de cada diseño, ecuación (2-2). El primer término incluye los costes relacionados con el material y los consumibles necesarios por unidad de producto (C_m). El segundo término incluye el coste de las herramientas, utillajes y máquinas (C_c) en función del tamaño del lote (N). El tercero representa el coste de producción unitario (C_l/N'). El último considera el coste improductivo (C_{np})

$$C = C_m + \frac{C_c}{N} + \frac{C_l}{N'} + C_{np} \tag{2-2}$$

Hay que destacar que esta investigación tiene como objetivo final la planificación de procesos conceptual, por lo tanto Feng (Feng y Song, 2000) también propone una metodología detallada para la estimación de costes en la planificación. En ella tiene en cuenta información sobre actividades de fabricación, tiempos y equipos para la fabricación, para aquellos procesos que son elegidos como aceptados.

- El método de graduación propuesto por Swift (Swift, 2003) calcula el coste del diseño en relación a las características de mismo. Es decir, es el único modelo que considera las propiedades de cada diseño para estimar los costes. Para ello Swift (Swift, 2003) define un modelo de costes basado en el material de la pieza y en una estimación de coste para procesar el diseño, ecuación (2-3)

$$M_i = V * C_{mt} + R_c * P_c \quad (2-3)$$

El coste del material tiene en cuenta el coste del tipo de material (C_{mt}) y el volumen de la pieza (V). El coste de procesar un diseño se determina mediante el coste de procesado básico (P_c) y mediante el coeficiente de coste relativo al diseño (R_c). El coste de procesado básico (P_c) es el coste de producir un diseño ideal para ese proceso. Este coste incluye los siguientes factores: el coste de los equipos y de las instalaciones, el coste de las operaciones (mano de obra, costes generales, etc.), el tiempo de procesado, el coste de herramientas y el volumen de producción. Dicha investigación proporciona, mediante representaciones gráficas, los valores de P_c en función del volumen de fabricación anual y del proceso de fabricación.

El coeficiente de coste relativo al diseño, R_c , es un coeficiente de coste que considera las propiedades del diseño que se está analizando. Este coeficiente se compone de un conjunto de coeficientes que tiene en cuenta la complejidad de la forma (C_c^b), la adecuación de material para el procesado (C_{mp}^a), las dimensiones de la sección (C_s^c), la tolerancia (C_t^d) y el acabado superficial (C_f^e). Estos coeficientes operan según la ecuación (2-4)

$$R_c = C_{mp}^a * C_c^b * C_s^c * C_t^d * C_f^e \quad (2-4)$$

2.3.1.4. Herramientas para la selección de procesos de fabricación.

El resultado de las investigaciones que se han ido citando durante el apartado 2.3.1 han derivado en el desarrollo de herramientas (software) que asisten en la selección de procesos durante el proceso de diseño. Estas herramientas pueden abarcar todos los procesos (Tabla 2-9) o algunos de ellos (Tabla 2-10).

Herramientas de selección	Estrategia de selección (Búsqueda libre / Cuestionario/ Razonamiento inductivo y analógico)	Objetivo y características de la herramienta
CES Selector (Esawi y Asbhy, 1998)	Búsqueda libre	Selección de materiales y procesos. Graduación de los procesos basada en costes. Única herramienta de selección disponible en el mercado para aplicación industrial.
MAMPS (Giachetti, 1997)	Búsqueda libre	Selección de materiales y procesos. Graduación de los procesos basada en el grado de compatibilidad entre los requerimiento de diseño y la capacidad de los procesos.
PRIMAs (Swift, 2003)		Conjunto de matrices de información de procesos para realizar la selección. Para los procesos de forma, estas matrices están basadas en el tipo de material y en el tamaño de lote de fabricación, mientras que para los procesos de unión se considera también el espesor de los elementos a unir. Esta investigación proporciona información relacionada con cada proceso para DFM.
WebMCSS* (Zha, 2005)	Búsqueda libre	Herramienta para seleccionar materiales y procesos en diseño conceptual a través de la Web. Para graduar los procesos se ha desarrollado un algoritmo de lógica borrosa que permite obtener la combinación de material y proceso más viable para la satisfacción técnica y económica. La herramienta proporciona información adicional sobre cada proceso viable. Es una herramienta interactiva, en el sentido que el usuario puede editar y modificar la base de datos de los procesos y de los materiales para complementar la información de la selección.
WiseProM* (Gupta y Chen, 2003) (Chen et al., 2000)	Búsqueda libre	Herramienta para seleccionar de materiales y procesos en diseño conceptual a través de la Web. La graduación de los procesos está basada en la estimación de costes. La herramienta permite seleccionar la secuencia de procesos: primario, secundario y terciario, para la fase de diseño de materialización.
MAS* (Brown y Wright, 1998; Smith et al., 2003)	Búsqueda libre	Primera herramienta para seleccionar materiales y procesos a través de la Web
MADED (Lenau, 2002)	Razonamiento inductivo y analógico	Herramienta que proporciona procesos y materiales potencialmente viables para un problema de diseño dado. La finalidad es proporcionar soluciones existentes a diseños que pueden ser completamente diferentes, pero con problemas comunes.

Tabla 2-9: Herramientas que asisten en la selección de todos los procesos de fabricación

Herramientas de selección	Procesos seleccionan	Estrategia de selección (Búsqueda libre / Cuestionario/ Razonamiento inductivo y analógico)	Objetivo y características
HyperQ/process (Ishii et al., 1991)	Procesos de forma neta o casi neta	Búsqueda libre	Selección de materiales y procesos. Graduación de los procesos basada en la compatibilidad de satisfacción de los requerimientos de cada proceso. Esta investigación es pionera en la selección de procesos.
(Darwish y El-Tamimi, 1996)	Procesos de fundición	Búsqueda libre/ Cuestionario	Sistema experto para la selección de procesos de fundición.
(Er y Dias, 2000)	Procesos de fundición	Búsqueda libre/ Cuestionario	Sistema experto para la selección de procesos de fundición.
(LeBacq et al., 2002)	Procesos de unión	Cuestionario	Sistema experto para la selección de procesos de unión.
(Ferrer et al., 2004)	Procesos de forma neta o casi neta	Búsqueda libre	Herramienta para seleccionar procesos de forma neta o casi neta en la fase de diseño conceptual. Esta herramienta permite seleccionar procesos para dos tipos de materiales, acero y aluminio, y considera atributos booleanos relacionados con la forma del diseño para refinar la selección. La graduación de los procesos está basada el modelo de costes propuesto por Swift (Swift, 2003).

Tabla 2-10: Herramientas que asisten en la selección de algunos procesos de fabricación

2.3.2. Diseño para fabricar

Diseñar para fabricar (DFM) es la práctica de diseñar teniendo la fabricación en mente (O' Driscoll, 2002). Diseñar para fabricar implica considerar simultáneamente objetivos de diseño y restricciones de fabricación para identificar y disminuir problemas de fabricación mientras el producto está siendo diseñado (Swift, 2003). La práctica de diseñar para fabricar tiene el objetivo principal de asegurar que el diseño es fabricable para un determinado proceso, así como también explicitar los beneficios, técnicos o económicos,

que dicho proceso puede proporcionar (O' Driscoll, 2002). De ese modo se reduce los costes y el tiempo de desarrollo de un producto, y se mejora la calidad del mismo (Gupta et al., 1995; O' Driscoll, 2002).

En el entorno de DFM los trabajos que se han desarrollado se diversifican en dos direcciones (Gupta et al., 1995; Herrman et al., 2004). La primera consiste en desarrollar guías o reglas que proporcionan al diseñador recomendaciones para diseñar una pieza considerando las limitaciones y las propiedades de un proceso dado. Estas guías son conocidas como las recomendaciones de DFM (*DFM guidelines*). La segunda consiste en desarrollar herramientas que permiten evaluar la fabricabilidad del diseño, desde el punto de vista de la fabricación del producto y desde el punto de vista de los costes estimados. Se expone a continuación cada una de estas líneas de investigación.

2.3.2.1. Recomendaciones de diseñar para fabricar

Las recomendaciones de diseñar para fabricar (*DFM guidelines*) son un conjunto de reglas sobre la capacidad y las restricciones técnicas de un proceso en relación al diseño (Swift, 2003). Las recomendaciones de DFM incluyen todas aquellas propiedades y limitaciones del proceso que pueden tener incidencia o relevancia sobre el diseño, y que por ello tienen que ser consideradas para poder fabricar dicho diseño con ese proceso. Estas recomendaciones pueden estar relacionadas con la geometría, la calidad de la pieza, los materiales o con otros requerimientos de producto.

Las recomendaciones son recopiladas para ser consideradas durante el proceso de diseño y su aplicación se considera como una “buena práctica de diseño”. A menudo se capturan de forma heurística, “basadas en sentido común”, y generalmente son verdad, aunque hay siempre excepciones (Gupta et al., 1995). Estas recomendaciones permiten a los diseñadores adquirir conocimiento para un diseño efectivo (Kuo et al., 2001). Por un lado, ayudan a los diseñadores a explotar las ventajas y a reconocer las limitaciones de los procesos, y por otro, previenen de errores básicos que podrían producirse durante la fabricación debido a un mal diseño.

Un conjunto de reglas generales han sido recopiladas por Swift (Swift, 2003) para ayudar al diseñador cuando piensa sobre la fabricación del producto. Aunque reglas relacionadas con procesos de fabricación más concretos, como procesos de mecanizado, fundición o deformación, también pueden ser encontradas en la literatura especializada en procesos de fabricación (Bralla, 1999; Kalpakjian y Schmid, 2001; Swift, 2003)

Entre las fuentes tradicionales para obtener estas guías de DFM se destacan: literatura específica de DFM, literatura general de procesos de fabricación y la experiencia de los expertos de fabricación reflejada principalmente en las recomendaciones de DFM desarrolladas por las propias empresas. Como fuente más novedosa, destacar el aumento notable de las recomendaciones computarizadas disponibles en la Web.

- Dentro de la literatura específica de DFM se destacan los trabajos realizados por (Bralla, 1999) y (Swift, 2003)

- (Bralla, 1999) proporciona guías de diseño muy explícitas y centradas en aspectos muy concretos de los procesos de fabricación en relación a diseño. Entre estos aspectos se destaca: la cantidad económica de producción, materiales convenientes para cada proceso, y un conjunto de recomendaciones generales y específicas focalizadas en la obtención de la geometría del diseño.
 - Siguiendo una estructura similar a la de Bralla (Bralla, 1999), Swift (Swift, 2003) propone un conjunto de reglas desde un punto de vista más simplificado y descriptivo. A excepción de las tolerancias, de las cuales proporciona unos gráficos con información bastante detallada de la variación de la tolerancia en función de las dimensiones y/o del peso de la pieza.
- Dentro de la literatura general de los procesos de fabricación se destacan los trabajos realizados por (Groover, 2002) y (Kalpakjian y Schmid, 2001), y los ampliamente conocidos como *Handbooks*.
- (Groover, 2002) y (Kalpakjian y Schmid, 2001) exponen los procesos de fabricación desde dos puntos de vista: desde el punto de vista tecnológico y desde el punto de vista del diseño de producto. La descripción tecnológica incluye: el procedimiento para llevar a cabo el proceso, las máquinas y los utillajes necesarios, los parámetros de cálculo para la obtención de las piezas, y el control de las variables de ejecución durante el desarrollo del proceso. La descripción desde el punto de vista del diseño de producto incluye información relacionada con los defectos y la calidad de la pieza final, los materiales adecuados para el proceso y las recomendaciones de diseño desde un punto de vista geométrico.
 - En la literatura conocida como *Handbook* (Committee under ASM direction, 1988; Committee under ASM direction, 1997; Committee under ASM direction, 1998) se expone una amplia y extensa variedad de información sobre los procesos de fabricación. Esta información cubre detalladamente todos los aspectos relacionados con la tecnología del proceso, los materiales, las máquinas, las herramientas y del diseño de producto. Relacionado con el diseño de producto se profundiza en temas como: efecto del proceso sobre la pieza, diferentes aplicaciones de los procesos, propiedades de las piezas procesadas, y en ocasiones, las reglas de diseño en función del tipo de material. En general, la información que proporciona está bastante relacionada con la dependencia del material.
- En los últimos años, Internet también se ha convertido en una fuente importante de información sobre recomendaciones de DFM. Existen varios sitios Web que proporcionan información sobre las recomendaciones de diseñar para fabricar. Entre ellos destacar: (NDP-solutions, 3w) y (Engineersedge, 3w)

2.3.2.2. Métodos de análisis de fabricabilidad

El análisis de fabricabilidad de un producto permite analizar el diseño para detectar problemas potenciales de fabricación y valorar el coste de fabricación (Gupta et al., 1995).

Según Gupta (Gupta et al., 1995): “los métodos para analizar la fabricabilidad deben aliviar la necesidad de estudiar y memorizar las recomendaciones de diseño, para que el diseñador pueda centrarse en aspectos creativos del proceso de diseño”.

Los métodos de análisis de fabricabilidad deben determinar si el diseño es o no fabricable por un proceso dado. Posteriormente, si el diseño es fabricable, debe determinarse la valoración de fabricabilidad. Esta valoración refleja la facilidad o dificultad con la cual el diseño puede ser fabricado. En el caso que el diseño no sea fabricable, deben identificar los atributos de diseño que impiden la fabricabilidad (Gupta et al., 1995).

Existen tres características que distinguen a los diferentes métodos de fabricabilidad (Gupta et al., 1995): el enfoque, la medida de la fabricabilidad y el nivel de automatización del sistema. El enfoque es el método o conjunto de reglas que definen si es o no fabricable. La medida es la escala con la que la fabricabilidad es valorada. El nivel de automatización indica como el diseñador interactúa con el sistema y que información se proporciona al diseñador como *feedback*.

La mayoría de las investigaciones que tratan el análisis de fabricabilidad se han centrado en el desarrollo de herramientas de software que permiten analizar la fabricabilidad durante el diseño del producto (Gupta et al., 1995; Chen et al., 2000). Por ejemplo para analizar la fabricabilidad de procesos concretos, Ishii (Ishii et al., 1991) desarrolló un sistema para estudiar la compatibilidad de los procesos de forma neta o caso neta (*near-net or net-shape*) en la obtención de un diseño y (Brown y Wright, 1998) desarrolló una herramienta para analizar la fabricabilidad de piezas para procesos de mecanizado.

Dentro de las herramientas de análisis de fabricabilidad que abarcan la mayoría de los procesos de fabricación se destaca la herramienta de DFM desarrollada por Boothroyd (Boothroyd et al., 2002). En esta herramienta, el análisis de fabricabilidad se realiza comparando las propiedades físicas del diseño con las limitaciones de cada proceso de fabricación. Cuando las propiedades de diseño están dentro del rango de las limitaciones de los procesos, el diseño es fabricable. En caso contrario, la herramienta especifica aquellas propiedades de diseño que impiden su fabricabilidad. Entre estas limitaciones de los procesos se incluyen: propiedades sobre la geometría, la tolerancia y las características de diseño que cada proceso es capaz de procesar. La valoración de fabricabilidad se realiza mediante la estimación de costes de fabricación del diseño. Para ello se considera información relacionada con: herramientas, máquinas, operaciones secundarias y algunas características geométricas del diseño que pueden resultar más comprometedoras para estimar los costes de fabricar con cada proceso.

Generalmente, los métodos para evaluar la fabricabilidad han convergido en métodos para la estimación de costes de piezas durante las fases iniciales del diseño (Kuo et al., 2001) (Swift, 2003). La estimación de costes representa un sistema de evaluación de los procesos desde el punto de vista de los costes que supondría fabricarlo con cada proceso.

El análisis de la literatura de DFM ha permitido reflejar la complementariedad entre ambas líneas de investigación, en el sentido que las recomendaciones de DFM son un punto base para las herramientas de análisis de fabricabilidad. Así como también ha puesto de

manifiesto el diferente modo de actuación de cada una de ellas en relación al diseño. Las recomendaciones de DFM son buscadas y analizadas por el diseñador para incorporar información de procesos antes de tomar decisiones sobre el diseño de producto. Mientras que en el análisis de fabricabilidad, la fabricación del diseño se analiza cuando las decisiones ya ha sido tomadas.

2.3.3. Discusión

La revisión de la literatura relacionada con la integración del proceso de fabricación en el diseño refleja el amplio interés mostrado por los investigadores desde los años 50 y la amplitud en la que se ha diversificado esta área de investigación.

La discusión que se plantea en este apartado tiene por objetivo resaltar aquellos aspectos, de la integración del proceso de fabricación en el diseño de producto, que resultan fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

- Desde el punto de vista de la necesidad de integrar el proceso de fabricación en el diseño, el diseñador necesita metodologías y herramientas de ayuda a la decisión para considerar el proceso de fabricación durante el diseño del producto.

La experiencia del diseñador es un pilar fundamental para considerar el proceso de fabricación en el diseño. Aunque la extensa cantidad de conocimiento asociado a los procesos de fabricación, junto con la diversidad de procesos existentes provoca que sea imposible adquirir experiencia en todos los aspectos.

Como consecuencia de ello, existe una necesidad de capturar, almacenar y hacer disponible al diseñador información de los procesos de fabricación, y este es uno de los objetivos de esta tesis. Esta necesidad conduce al desarrollo de herramientas que permiten utilizar esta información bajo un objetivo determinado, como por ejemplo, para seleccionar procesos de fabricación o para diseñar para fabricar (DFM).

- Desde el punto de vista de la captura de la información de procesos que es relevante para el diseño, las investigaciones de la selección de procesos y las de DFM coinciden en que para capturar esta información es necesario considerar la información de diseño disponible.
- Desde el punto de vista de la disponibilidad de la información de los procesos en relación al diseño, el conocimiento que proviene de la experiencia es el más completo, en el sentido de que los expertos pueden capturar, relacionar, interpretar información de situaciones complejas, para posteriormente aplicarlo e integrarlo en otras situaciones. No obstante, este conocimiento debe ser definido y documentado de forma explícita para hacerlo disponible a otros diseñadores sin experiencia.

Los documentos o prácticas internas desarrolladas en las empresas son un buen referente para obtener información de DFM, pues documentan y almacenan dicha información en base a la experiencia. Sin embargo estas prácticas están limitadas a las empresas donde se desarrollan y están difícilmente disponibles fuera de dicho entorno.

Las investigaciones desarrolladas en la selección de procesos resultan un buen referente para extraer la información de procesos que tiene relación con diseño, pues definen la información de forma explícita y estructurada, lo cual no es fácil en este campo de aplicación. En cambio, también existe información más específica de cada proceso que podría ser considerada para complementar la decisión en la selección de procesos, como por ejemplo el ángulo de desmoldeo o la anisotropía de una pieza de forja. Las investigaciones desarrolladas en otros tipos de selección (funcional o tareas de fabricación) también son buenos referentes para extraer la información de procesos que tiene relación con diseño, aunque los trabajos publicados son todavía escasos.

Relacionado con las fuentes que recopilan información de los procesos para las recomendaciones de DFM, en general, la información más común hace referencia a la obtención de la geometría de la pieza, y en ese sentido la información está disponible de forma clara y explícita. Pero se detectan ciertos grados de desequilibrio y de ambigüedad en la información que no hace referencia a la geometría y que también es importante que el diseñador conozca para DFM (Swift, 2003). El desequilibrio se debe a que no todos los procesos se tratan desde las mismas perspectivas y con el mismo nivel de detalle, y la ambigüedad porque la información, en ocasiones, está expuesta de forma compleja y en ocasiones incompleta. Consecuentemente la experiencia del diseñador se convierte en un punto clave para entenderla e identificar la información necesaria para DFM (Swift, 2003).

- Desde el punto de vista de los procedimientos sistemáticos desarrollados para capturar la información de los procesos para DFM, con la finalidad de asistir al diseñador, los trabajos desarrollados son escasos.

En la selección de procesos de fabricación se sobreentiende que la captura de la información se realiza comparando la información disponible de diseño con el conocimiento de los procesos de fabricación, y posteriormente se busca un conocimiento común entre todos ellos que permita hacer la discriminación. Pero no se formaliza de forma explícita este procedimiento.

Desde el punto de vista de las investigaciones de DFM, la captura de la información se realiza principalmente mediante procedimientos heurísticos en los que la propia experiencia de los expertos, junto con la información contenida en la literatura especializada se convierte en las fuentes principales para su desarrollo.

Los trabajos desarrollados hasta el momento en la selección de procesos y en el DFM han resultado de suma importancia en la mejora de la competitividad en el desarrollo de producto. Los resultados de estas investigaciones resultan claves para el éxito en el desarrollo de los productos porque proporcionan al diseñador conocimiento sobre los procesos relativamente rápido, en comparación a si lo tuvieran que adquirir con la experiencia. A pesar de ellos, en la integración de diseño y fabricación todavía queda campo de investigación.

2.4. Establecimiento del problema

Después de haber realizado un análisis detallado de las dos partes del estado del arte que afectan a la integración del proceso de fabricación en el proceso de diseño, y tras discutir los aspectos que resultan fundamentales para el desarrollo de esta tesis en cada una de dichas partes, la problemática en la que se va a centrar esta tesis se puede resumir en los siguientes puntos:

- El proceso de fabricación debe considerarse lo antes posible en el proceso de diseño con el objetivo de mejorar la integración de diseño y de fabricación.
- El proceso de fabricación puede ser considerado durante el proceso de diseño cuando el diseñador conoce el proceso o cuando la información del proceso está disponible para que el diseñador pueda considerarla. Para ello se requiere capturar y documentar la información de los procesos que puede ser relevante para el diseño.
- Disponer de información y conocimiento del proceso antes de tomar decisiones sobre las soluciones de diseño que satisfacen los requerimientos funcionales y las restricciones, evita posibles redefiniciones de diseño posteriores. En ese sentido las técnicas de DFM y la selección de procesos de fabricación se convierten en investigaciones fundamentales.
- La información y el conocimiento de los procesos que tiene que estar disponible para el diseñador depende de la información disponible de diseño. Cualquier propuesta que se plantee para capturar la información y conocimiento de los procesos tiene que considerar el proceso de diseño.
- Además, esta información de los procesos tiene que limitarse a aquella información que es realmente necesaria. Esto significa, aquella información de los procesos que puede afectar para obtener las posibles soluciones de diseño que pueden satisfacer los requerimientos funcionales y sus restricciones asociadas. Por este motivo el uso de procedimientos sistemáticos de diseño como la teoría de Diseño Axiomático es fundamental en el desarrollo de esta tesis.
- Generalmente, bastante información de diseño (requerimientos funcionales y parámetros de diseño) no se define de modo explícito y formal en las fases iniciales del diseño (Chakrabarti et al., 2004). Como consecuencia capturar el conocimiento y la información de los procesos que puede ser relevante en las fases iniciales del diseño es dificultoso.
- Para facilitar la captura de la información de los procesos para DFM se precisa de:
 - a. El uso y desarrollo de procedimientos sistemáticos para definir y formalizar la información de diseño
 - b. El uso de procedimientos sistemático de diseño, como la teoría de Diseño Axiomático, que faciliten la definición explícita y completa de la misma.
- La captura de la información y conocimiento de fabricación es compleja, debido a (Ferrer et al., 2006a):

- La escasez de procedimientos sistemáticos para capturar, organizar y representar este tipo de información (Swift, 2003).
- La fuerte dependencia de la información de procesos con información empírica que proviene de años de experiencia.
- La amplia diversidad de procesos existentes. Incluyendo procesos tradicionales que pueden haber quedado obsoletos, otros que son mejorados y otros que están siendo desarrollados.
- La amplia diversidad de información que hay asociado a cada uno de ellos y el poco conocimiento explícitamente representado sobre cómo utilizarlos en DFM.

Con la finalidad de colaborar en la resolución la problemática planteada, en esta tesis se ha desarrollado un procedimiento sistemático para capturar, definir, formalizar y documentar la información de los procesos que es realmente necesaria para DFM. Considerando que esta información necesaria de los procesos es aquella que afecta a las soluciones de diseño que se definen para satisfacer los requerimientos de producto.

Este procedimiento utiliza como base la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001) y demuestra que esta teoría puede ser usada para dar soporte a las técnicas de DFM.

Capítulo 3. Desarrollo de la propuesta

3.1. Introducción

En este capítulo se propone una metodología para identificar, definir y formalizar la información de los procesos de fabricación que puede ser necesaria conocer durante la fase de diseño, y que por ello debería estar disponible durante dicha fase. En este sentido se puede considerar que la metodología propuesta se encuadra dentro de las técnicas de DFM. Los resultados del desarrollo de esta metodología se van a utilizar para definir un primer prototipo de modelo de información que podría ser utilizado en el desarrollo de una aplicación que proporcionase información de los procesos durante la fase de diseño.

En primer lugar, se expone un glosario de términos utilizados en la metodología.

En segundo lugar, se propone una exposición general sobre las consideraciones que se han tenido en cuenta para desarrollar la metodología. Así como también, los principios básicos de la misma.

En tercer lugar se describe dicha metodología, basada en la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001). Inicialmente se presentan las fases, y posteriormente se detallan las etapas que deben llevarse a cabo en cada uno de los dominios que la componen. También se muestra un esquema detallado que resume la metodología propuesta

Finalmente, se expone el prototipo de modelo de información.

3.2. Glosario de términos

En este apartado se exponen los términos que se han empleado durante el desarrollo de la metodología:

- Atributos de los procesos de fabricación: son el conjunto de propiedades y restricciones que describen un proceso de fabricación para poder hacer comparaciones directas y objetivas entre los procesos de fabricación y los requerimientos de producto (Lovatt y Shercliff, 1998b). Estos atributos son comunes entre todos los procesos. De este modo se consigue discriminar y graduar entre ellos.
- Dominios de diseño: representan las fronteras que definen el proceso de diseño: dominio de cliente, dominio funcional, dominio físico y dominio de proceso (Suh, 2001)
- Estructura física: representan la materialización de un conjunto de funciones que están relacionadas y a las cuales el producto tiene que satisfacer (Van Wie, Mike J. et al., 2003).
- Función: representa qué tiene que hacer el producto (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001).
- Parámetros de diseño (DPs): son las variables físicas claves que caracterizan el diseño en el dominio físico para satisfacer los requerimientos funcionales (FRs) (Suh, 2001).
- Propiedades de los procesos (PPs): son las características de los procesos que reflejan las limitaciones, restricciones y los requerimientos del proceso para conseguir los parámetros de diseño que se definen en el dominio físico. Por ejemplo la tolerancia que un proceso es capaz de conseguir en una pieza dada.
- Propiedades de producto: son las propiedades que definen físicamente las estructuras físicas, desde el punto de vista de material, dimensiones, forma y acabado superficial. Estas propiedades se definen para satisfacer las funciones de sus correspondientes estructuras y limitan las soluciones de diseño que satisfacen a los requerimientos funcionales.
- Requerimientos de producto: son declaraciones que especifican el problema que se quiere resolver considerando las necesidades del cliente y aspectos técnicos (Rios et al., 2006).
- Requerimiento funcional (FR): es una declaración que representa lo que el producto tiene que hacer independientemente de la solución de diseño adoptada (Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001), es decir la función que el producto tiene que satisfacer. Es una declaración única y no ambigua de una única funcionalidad formulada en lenguaje natural, escrita de manera que pueda ser categorizada, trazada, medida, verificada y validada (Rios et al., 2006).

- Restricción (C): es una declaración que actúa limitando a algún tipo de requerimiento o parámetro de diseño, y limita el rango de soluciones de diseño posibles (Alexander y Stevens, 2002; Rios et al., 2006)
- Variables de ejecución de los procesos (EVs): son las variables que hay que controlar durante la ejecución del proceso para conseguir con éxito los parámetros de diseño que se definen en el dominio físico. Por ejemplo la temperatura de la pieza que hay que controlar durante el proceso de forja en matriz cerrada.
- Variables del proceso (PVs): son las variables claves que caracterizan el proceso que hay que desarrollar para generar los parámetros de diseño definidos en el dominio físico (Suh, 2001). En los procesos de fabricación se distinguen dos tipos de variables de proceso (PVs): las propiedades del proceso (PPs) y las variables de ejecución del proceso (EVs).

3.3. Consideraciones previas

La metodología desarrollada está basada en la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001) y en las técnicas de diseñar para fabricar (DFM). Los aspectos que se toman como fundamentales de cada una de estas investigaciones para el desarrollo de esta metodología son los siguientes:

Teoría de Diseño Axiomático

- La declaración explícita de la información de diseño y su correspondiente relación mediante dominios: el dominio de cliente, el dominio funcional, el dominio físico y el dominio de proceso.
- El manifiesto explícito de la relación que existe entre el dominio físico y el dominio de proceso. Además de la consideración que en el dominio de proceso hay que definir las variables del proceso (PVs) que caracterizan el proceso que permiten obtener los parámetros de diseño (DPs). Es decir, las variables del proceso que pueden afectar para obtener los parámetros de diseño.
- En cualquier dominio de diseño, hay que definir la mínima información para satisfacer la funcionalidad del producto. Lo cual conduce a determinar la información del proceso necesaria que puede afectar para obtener las soluciones de diseño.
- El proceso de fabricación repercute en el diseño desde las fases iniciales del mismo. La relación entre el dominio del proceso y el dominio físico se establece en cualquier fase del diseño. Además, el proceso también afecta al cumplimiento de los requerimientos funcionales, a través del dominio físico. Porque el dominio de proceso afecta para obtener las soluciones de diseño que satisfacen los requerimientos del dominio funcional.

Tras remarcar estos aspectos de la teoría de Diseño Axiomático, se concluye que la teoría de Diseño Axiomático puede ser utilizada como una técnica que permite implementar un procedimiento para capturar la información necesaria de los procesos para DFM.

Considerando que esta información de procesos necesaria es aquella que afecta a los parámetros de diseño que satisfacen los requerimientos funcionales del producto.

Técnicas de DFM

- Las técnicas de DFM representan una fuente muy importante de información para representar de forma explícita la relación que puede existir entre soluciones de diseño y los procesos de fabricación. Por ello considerar la información disponible en estas técnicas es fundamental para capturar y formalizar la información que debe darse al diseñador durante el proceso de diseño. Como se observa en la Figura 3-1, a modo de generalización, se incluye en estas técnicas los dos campos de investigación de la integración del proceso de fabricación en el diseño: la selección de procesos y el DFM.

Tomando en consideración estos aspectos de la teoría de Diseño Axiomático y la información disponible en las técnicas de DFM, el marco en el cual se desarrolla la metodología se expone en la Figura 3-1:

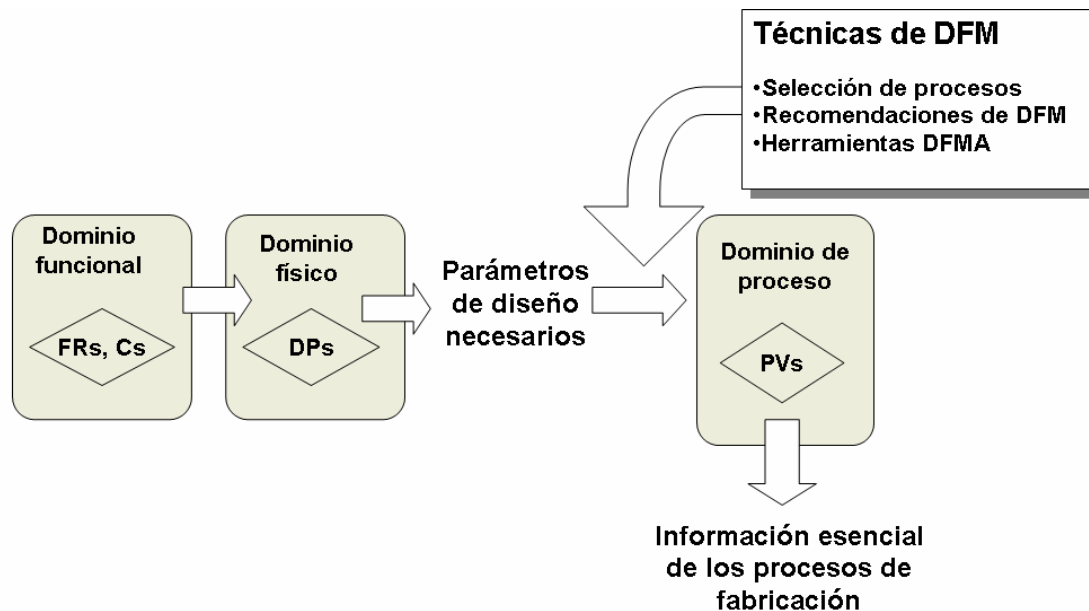


Figura 3-1: Aproximación propuesta: Diseño Axiomático para formalizar en concepto de DFM

La teoría de Diseño Axiomático se centra en determinar los parámetros de diseño (DPs) que son realmente necesarios para satisfacer los requerimientos funcionales del producto (FRs) y sus restricciones asociadas (Cs). Posteriormente, el análisis de los parámetros de diseño necesarios y la información de los procesos disponible en las técnicas de DFM permite identificar la información necesaria de fabricación que debería estar disponible para el diseñador. El objetivo es proporcionar sólo aquella información de fabricación que es relevante para la obtención de los parámetros de diseño.

En esta tesis, se toma la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001) como base para formalizar la aplicación del concepto de DFM. Sobre dicha teoría se añaden una serie de acciones.

Considerando este marco de trabajo, a continuación se presentan las tareas que tienen que ser consideradas para desarrollar una metodología que permita capturar y formalizar la información de procesos necesaria para DFM.

1. Definir y formalizar la información de diseño; los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño. En caso contrario la información necesaria de los procesos no se podrá obtener. Aunque la técnica de Diseño Axiomático induce a que esta información se explicita en cada fase de diseño, no profundiza en el aspecto de la definición y formalización de dicha información.
2. Desarrollar un procedimiento de correspondencia entre el dominio físico y el dominio de proceso para capturar la información de los procesos necesaria para DFM. Pues la teoría de Diseño Axiomático declara de forma explícita la correspondencia entre el dominio físico y el dominio de proceso, pero no trabaja en profundidad esta correspondencia.
3. Definir y formalizar la información de los procesos que pueden afectar para obtener los parámetros de diseño.

La metodología se ha desarrollado para ser aplicada al diseño de componentes o lo que es lo mismo de piezas. Ciertamente, aplicar la metodología a componentes que ya están diseñados es más fácil, porque, aunque no se dispongan de la información de forma explícita, su obtención es más sencilla. De todos modos, no se excluye la aplicación a diseños completamente nuevos.

En relación a los procesos de fabricación, la metodología ha sido desarrollada para ser aplicada a procesos de fabricación de forma, según la clasificación de procesos propuesta por (Groover, 2002). Esta clasificación incluye procesos de: conformado, deformación y arranque de material. En este trabajo la metodología se ha aplicado a procesos de forja y de pulvimetalurgia. Concretamente a los procesos de: forja de matriz cerrada, compactación y sinterizado de polvo de metal, y forjado de polvo de metal.

Es importante remarcar que para aplicar esta metodología se requiere de cierta experiencia por parte del usuario tanto en el proceso de diseño, como cierto conocimiento en los procesos de fabricación.

3.4. Descripción de la metodología

3.4.1. Introducción

La metodología que se ha desarrollado se divide en dos fases: la fase de la información de diseño y la fase de la información del proceso de fabricación, Figura 3-2.

- La fase de información de diseño tiene el objetivo de definir y formalizar los parámetros de diseño necesarios (DPs) que satisfacen los requerimientos funcionales (FRs) y sus restricciones (Cs).
- La fase de la información del proceso de fabricación tiene el objetivo de identificar, definir y formalizar la información necesaria de los procesos de fabricación que puede afectar en la obtención dichos parámetros de diseño (DPs).

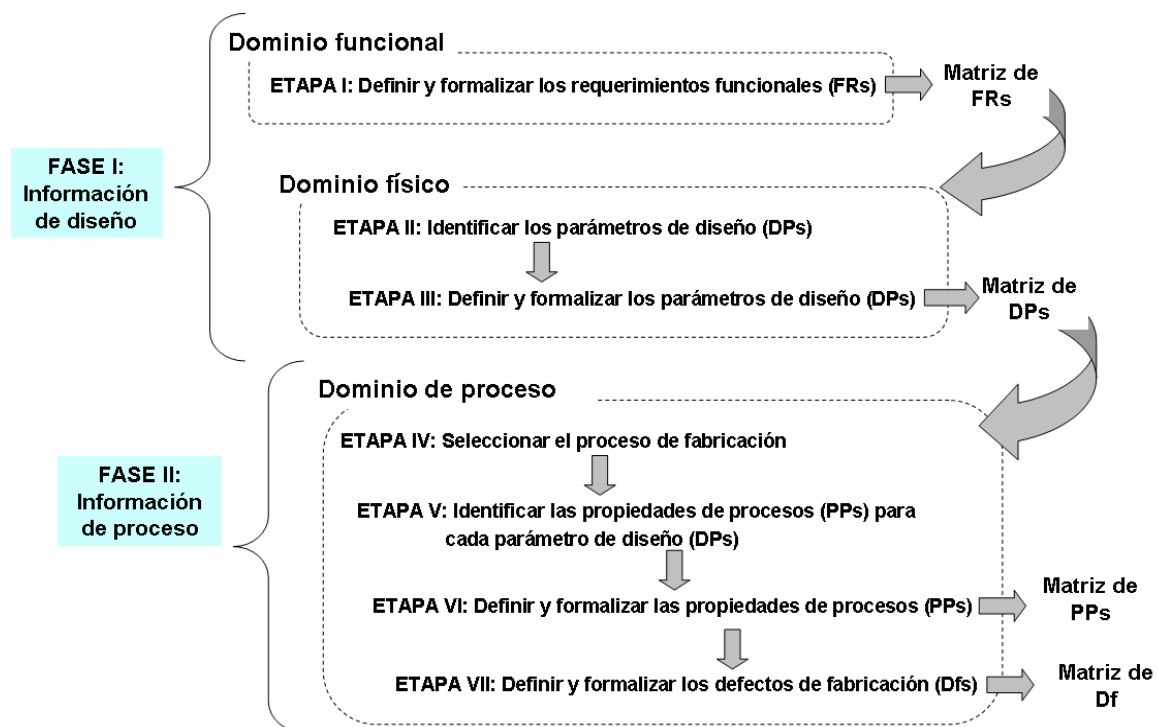


Figura 3-2: Estructura de la metodología propuesta

Cada fase de la metodología se estructura tomando como referencia los dominios de diseño de la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001). Dentro de cada uno de los dominios se han identificado las etapas necesarias que permiten alcanzar el objetivo final que se persigue; obtener la información de los procesos para DFM en el diseño de componentes.

La fase de información de diseño integra el dominio funcional y el dominio físico. Se asume que la información del dominio del cliente ya ha sido definida.

- En el dominio funcional se deben definir, formalizar y documentar los requerimientos funcionales (FRs) del componente.
- En el dominio físico es necesario identificar los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen los requerimientos funcionales. No obstante, considerando que los parámetros de diseño evolucionan, estos deben estar en el nivel adecuado para capturar la información de los procesos. Los parámetros de diseño deben ser definidos, formalizados y documentados para cualquier fase de diseño.

La fase de información de proceso integra el dominio de proceso.

- En el dominio de procesos es necesario primeramente seleccionar los procesos de fabricación que son válidos para cumplir con la información de diseño definida en las fases iniciales del mismo, o aquellos procesos que se desean estudiar para dicho diseño. Posteriormente, para cada proceso hay que determinar la información del proceso que puede afectar para obtener cada uno de los parámetros de diseño del dominio físico. Esta información del proceso debe ser definida, formalizada y documentada para cualquiera de los parámetros de diseño a los cuales afecta.

Considerando que en las fases iniciales de diseño varios procesos de fabricación pueden ser válidos para un mismo diseño, la metodología permite capturar y formalizar la información de cada uno de los procesos de fabricación para un mismo diseño. Para ello es suficiente con aplicar la Fase II que se propone en la metodología a una misma información de diseño obtenida en la Fase I.

En los procesos de fabricación, el proceso puede afectar de dos formas diferentes en la obtención de los parámetros de diseño (DPs): con las propiedades de los procesos (PPs) y con las variables de ejecución de los procesos (EVs) (ver las definiciones en el 3.2 Glosario de términos). La principal diferencia entre ambas es la repercusión que cada una de ellas tiene sobre los parámetros de diseño (DPs).

- Las propiedades de los procesos (PPs) pueden invalidar el proceso de fabricación para obtener el parámetro de diseño (DP), en función del valor asignado al DP. Es decir, si una propiedad de proceso (PP) está fuera del rango del valor asignado al DP, el proceso no es válido para obtener dicho parámetro de diseño (DP). Por ejemplo si una pieza tiene que tener un DP espesor de 3mm y la PP espesor de un proceso determinado es de [5-20] mm, el proceso no será válido para fabricar esa pieza.
- Las variables de ejecución (EVs) afectan a los parámetros de diseño (DPs) mediante los defectos que se pueden generar en la pieza como consecuencia del control incorrecto de estas variables durante el procesado (Committee under ASM direction, 1988). Por ejemplo, en el proceso de forja en matriz cerrada, si el tiempo de calentamiento no es controlado adecuadamente, se puede producir el crecimiento del grano que afectará a las propiedades mecánicas de la pieza.

Considerando esta diferencia, la metodología propuesta se va centrar en identificar y formalizar las propiedades del proceso (PPs) que pueden afectar para obtener los parámetros de diseño (DPs). Porque esta es la información del proceso que debería estar

disponible inicialmente para el diseñador para DFM. Pero además, desde el punto de vista de DFM, también sería interesante que el diseñador pudiera conocer los defectos de fabricación más comunes que cada uno de los procesos puede generar en el diseño, como consecuencia de un control incorrecto de las variables de ejecución (EVs). Por este motivo, esta metodología también tratará la definición y formalización de los defectos de fabricación (Dfs)

En esta tesis se ha considerado que la información sobre las variables de ejecución (EVs) debería proporcionarse en la fase de la planificación del proceso y no en la fase de diseño. A pesar de ello, comentar que la formalización de los EVs no debería diferir substancialmente de la formalización que se propone en esta tesis para las propiedades de los procesos (PPs). Este aspecto se considera como una posible línea de ampliación de esta tesis.

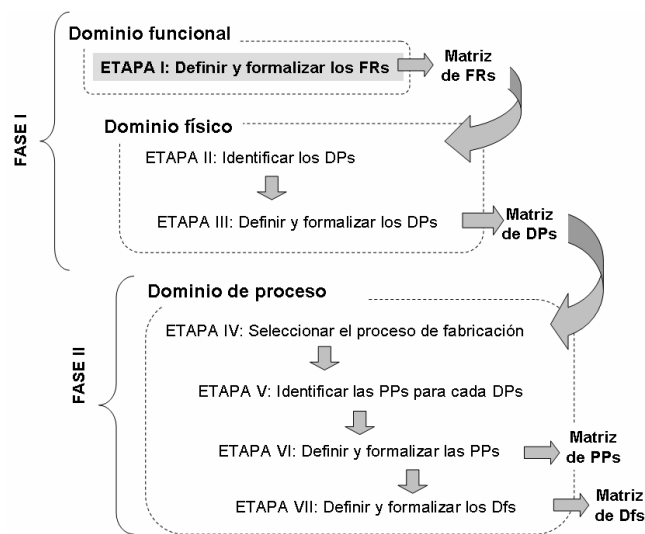
3.4.2. Desarrollo de la metodología

El desarrollo de la metodología se presenta a continuación, según la estructura de la Figura 3-2. Primero se describen todas las etapas de la Fase I, y posteriormente las etapas que están incluidas en la Fase II.

3.4.2.1. Fase I: Definición de la información de diseño

Dominio funcional

Etapa I: Definir y formalizar los requerimientos funcionales (FRs)



Para iniciar la metodología se requiere que la información de partida, concretamente los requerimientos de producto, estén estructurados de modo que se pueda diferenciar claramente: las funciones, las restricciones asociadas a las funciones y las restricciones de diseño. En el caso que la información no esté estructurada se propone utilizar la metodología propuesta por Otto (Otto y Wood, 2001) para diferenciar esta información partiendo de los requerimientos de producto.

Para definir los requerimientos funcionales (FRs) se ha planteado la estructura que tiene que tener un requerimiento funcional (FR). Esta estructura refleja toda la información que tiene que contener un FR, y que por ello se tiene que definir. Para formalizar y representar los requerimientos

funcionales se ha propuesto una matriz que permite explicitar y documentar toda la información asociada a cada uno de ellos.

a. Estructura de los requerimientos funcionales (FRs)

La estructura de los requerimientos funcionales se obtiene de adaptar la estructura de los requerimientos funcionales para el diseño de utillajes, propuesta por Hunter (Hunter et al., 2006)(apartado 2.2.2.1), al diseño de componentes. La estructura resultante se expone en la Figura 3-3.

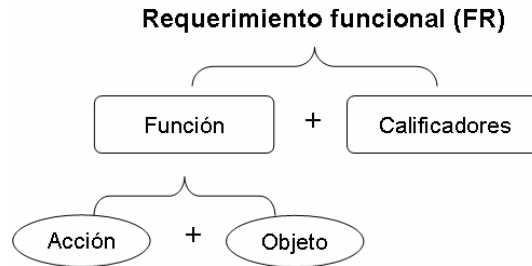


Figura 3-3: Estructura de un requerimiento funcional (FR) para el diseño de componentes

- La función representa qué tiene que hacer el producto (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001). La función se compone de la acción y el objeto (Hunter et al., 2006).
- Los calificadores representan las restricciones que acompañan a las funciones, y limitan las posibles soluciones de diseño (Hunter et al., 2006).

El cambio más relevante respecto a la estructura propuesta por Hunter (Hunter et al., 2006) consiste en considerar el “recurso” donde se llevan a cabo la función como un calificador, concretamente como una restricción de entorno. El motivo radica en asumir que el entorno puede actuar como una restricción del requerimiento, porque puede limitar las soluciones de diseño que satisfacen dicho requerimiento funcional. Otro de los cambios es consecuencia de un puro formalismo. Este cambio consiste en estructurar la función tal y como es ampliamente definida en la literatura de diseño, mediante la acción y el objeto (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001). De este modo se evita confusiones y se hace explícita la definición de la función.

El lenguaje que se va utilizar para definir los requerimientos funcionales será el lenguaje natural. De este modo los requerimientos funcionales pueden ser definidos e interpretados por cualquier diseñador.

A continuación se define más detalladamente cada una de las partes que componen la estructura de un requerimiento funcional (FR) mostrado en la Figura 3-3.

Acción

La acción se refiere a la función que el producto debe satisfacer. La acción se expresa mediante un verbo en activo (Ullman, 1992; Otto y Wood, 2001; Hunter et al., 2006). Por ejemplo: transportar o conectar.

Objeto

El objeto representa la “entidad” sobre la cual se efectúa o lleva a cabo la acción. Por ejemplo: transportar “cajas”. Pero asumiendo que el diseño de componentes es un sistema técnico (Pahl et al., 1996), estas “entidades” incluyen cualquiera de los flujos (energía, material y señales) que son convertidos o canalizados en cualquier sistema técnico, Figura 3-4. El objeto se expresa mediante un nombre que permite representar dichos flujos.



Figura 3-4: Representación de la función en un sistema técnico (Pahl et al., 1996).

Mediante la acción y el objeto se representa la función del producto, que es la base fundamental de los requerimientos funcionales. Algunos ejemplos de funciones formalizadas se expone en la Tabla 3-1:

FUNCION	
Acción (verbo activo)	Objeto (flujo: nombre)
Soportar	Fuerzas
Conectar	Dos elementos
Transmitir	Señal de alarma

Tabla 3-1: Ejemplos de funciones formalizadas

No obstante para obtener el requerimiento funcional completamente definido no es suficiente con definir la función, puesto que el requerimiento no queda limitado. Para limitar los requerimientos funcionales, que posteriormente limitaran las soluciones de diseño, se tienen que definir los calificadores (Hunter et al., 2006; Rios et al., 2006)

Calificadores

Los calificadores representan las restricciones (Cs) que acompañan a las funciones, y limitan las posibles soluciones de diseño. El calificador se expresa con un nombre o mediante grupos adverbiales (Hunter et al., 2006). Los calificadores pueden ser cualitativos

o cuantitativos (Perez et al., 2005). Los calificadores cuantitativos representan las restricciones mediante un valor o rango de valores numéricos, mientras que los cualitativos son descriptivos y a menudo es complejo expresarlos mediante valores numéricos o relaciones matemáticas (Perez et al., 2005). Un ejemplo de calificador cualitativo podría ser: “la trayectoria tiene que ser lineal respecto al eje Y”. Mientras que un ejemplo de calificador cuantitativo sería: “la fuerza tiene un valor comprendido entre [20-25] N”. Los requerimientos funcionales (FRs) pueden llevar asociados ambos tipos de calificadores (Perez et al., 2005), aunque según Hunter (Hunter et al., 2006) cada requerimiento funcional (FR) tiene que llevar asociado como mínimo un calificador cuantitativo.

Desde el punto de vista de la formalización, los calificadores cuantitativos se deben definir, con al menos, un valor numérico, la unidad de medida y la tolerancia (Hunter et al., 2006). Mientras que los cualitativos se pueden definir mediante nombres, adjetivos o grupos adverbiales.

Dentro de los calificadores se distinguen dos tipos de restricciones: las restricciones de la función y las restricciones de diseño. La diferencia principal entre ellas es que las restricciones de la función provienen directamente del análisis de la función del requerimiento funcional en el dominio funcional, mientras que las restricciones de diseño provienen del análisis de los requerimientos de producto que afectan a los parámetros de diseño del dominio físico.

- Las restricciones de la función son calificadores que van asociados a la ejecución de la función. Por ello limitan las soluciones físicas que se tienen que definir para satisfacerla. Las restricciones de función pueden ser de tres tipos: restricciones de entrada, de salida o de entorno.
 - Las restricciones de entradas son las limitaciones que actúan antes de ejecutar la acción. Un ejemplo sería el valor de la fuerza que tiene que transmitir una biela de un MCI (Afzal y Fatemi, 2003), Tabla 3-2.
 - Las restricciones de salida son las limitaciones asociadas al resultado obtenido después de aplicar la acción. Un ejemplo sería el esfuerzo máximo de dicha biela después de aplicarle dicha carga (Afzal y Fatemi, 2003), Tabla 3-2.

	Flujo	Valor nominal	Unidades	Tolerancia
Restricciones de entrada	Fuerza compresión	20-25	KN	+/- 5
Restricciones de salida	Tensión máxima	800	MPa	+/- 10

Tabla 3-2: Ejemplos de formalización de restricciones de entrada y de salida.

Para identificar las restricciones de entrada y de salida se puede aplicar el análisis de los flujos de entrada y salida asociados a la función; siguiendo el esquema de la función que se ha mostrado anteriormente en la Figura 3-4.

- Las restricciones de entorno son las limitaciones que provienen del escenario o del ambiente donde se desarrolla la acción. Porque las condiciones del entorno también pueden limitar las soluciones físicas de diseño que satisfacen la función. En términos generales, se puede decir que las condiciones atmosféricas (temperatura o presión) o las condiciones de entorno físico (contacto entre elementos o elementos colindantes) pueden ser causantes de este tipo de restricciones. Un ejemplo sería el entorno de elevada temperatura en la que se desarrollan las funciones de la biela de un MCI, Tabla 3-3.

Restricción de entorno	Valor nominal	Unidades	Tolerancia
La biela debe resistir una temperatura de	[80-90]	°C	+/- 10

Tabla 3-3: Ejemplos de formalización de una restricción de entorno

Para identificar estas restricciones se pueden plantear todas aquellas preguntas que puedan proporcionar información sobre el entorno donde se desarrolla la acción. Preguntas como: dónde, cuándo y cómo se desarrolla la acción, pueden ayudar a identificar este tipo de restricciones.

- Las restricciones de diseño son las limitaciones que están directamente relacionadas con la definición física del componente. Un ejemplo de ello sería la limitación de masa o el ancho límite que puede tener un componente, Tabla 3-4.

Restricción de diseño	Valor nominal	Unidades	Tolerancia
La biela tiene que tener una masa comprendida entre	[0.55-0.65]	kg	+/- 0,001
La biela tiene que tener un ancho límite de	30	mm	+/- 0.1

Tabla 3-4: Ejemplos de formalización de restricciones de diseño

Para identificar este tipo de restricciones se pueden buscar aquellos requerimientos de producto que se corresponden con propiedades físicas del componente, es decir, que representen como tiene que ser el producto (Otto y Wood, 2001).

b. Matriz de formalización y representación de los requerimientos funcionales (FRs)

Considerando toda la información que puede ir asociada a los requerimientos funcionales (FRs), se propone una matriz para su formalización en la Tabla 3-5.

El objetivo de esta matriz es almacenar y documentar de forma explícita y completa toda la información asociada a cada FR. La matriz contiene el código y la descripción del requerimiento funcional, y toda la información que puede ir asociada a dicho requerimiento debidamente formalizada.

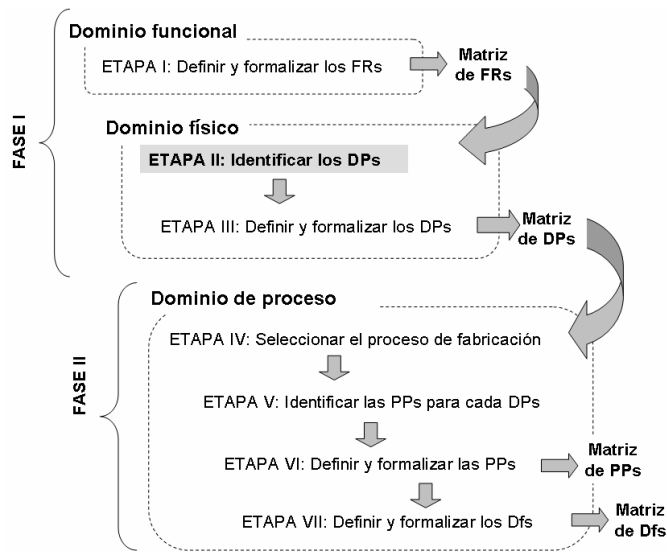
La información para completar esta matriz se obtiene tras identificar todos los elementos de la estructura que se ha propuesto para definir los requerimientos funcionales (FRs). Los valores de las restricciones deben añadirse en la medida que estén disponible, pues los valores de las restricciones se refinan y se definen en la medida que el diseño avanza (Hunter et al., 2006; Rios et al., 2006)

FORMALIZACION DE UN FRs				
Nivel predecesor de FRs				
Código requerimiento				
Descripción requerimiento				
<i>FUNCION</i>				
	<i>Acción (verbo)</i>	<i>Objeto (Flujo)</i>		
Función				
<i>Tipo de Restricción</i>	Descripción de la restricción (Cs)	Valor	Unidades.	Tolerancia
Entrada				
Salida				
Entorno				
Diseño				

Tabla 3-5: Matriz de formalización de un requerimiento funcional (FR)

Dominio físico

Etapa II: Identificar los parámetros de diseño (DPs)



Cuando los requerimientos funcionales están formalizados y documentados, la siguiente etapa consiste en identificar los parámetros de diseño (DPs) que hay que definir para satisfacerlos.

No obstante, en el diseño de componentes primero se identifican las estructuras físicas del producto y posteriormente se determinan los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen los requerimientos funcionales de dichas estructuras (apartado 2.2.1.1)

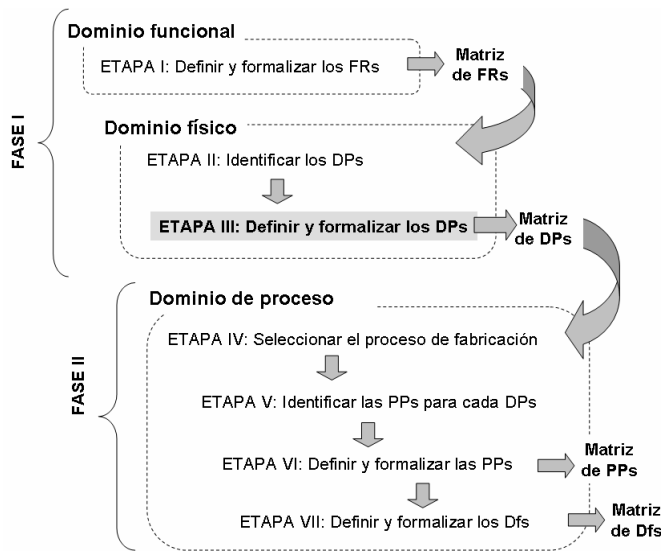
Asumiendo que identificar las estructuras físicas de producto es un paso indispensable en el diseño del producto para configurar su arquitectura (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001; Suh, 2001), este nivel de definición física no es adecuado para determinar la información de los procesos que debería estar disponible para DFM. Para determinar esta información es necesario identificar los parámetros de diseño (DPs).

Es ampliamente conocida las limitaciones de los procesos de fabricación para obtener los parámetros de diseño (DPs), mientras que no es tan común las limitaciones de los procesos para obtener definiciones físicas más genéricas como son las estructuras físicas. Tiene sentido preguntarse si el proceso de fabricación puede afectar para conseguir un determinado valor de rugosidad de una biela de MCIA, en cambio, no tiene tanto sentido plantearse si el proceso puede afectar para obtener estructuras físicas como pueden ser: la cabeza, el cuerpo o el pie de la biela.

Tras este análisis se concluye que para el desarrollo y la aplicación de esta metodología es necesario determinar hasta el nivel de los parámetros de diseño (DPs) para obtener la información de los procesos que debería estar disponible para DFM.

Para identificar estos parámetros de diseño (DPs) se pueden utilizar los métodos de búsqueda de soluciones tradicionales propuestos por las metodologías de diseño (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996). Como pueden ser: búsqueda literaria, lluvia de ideas (*brainstorming*), analogía, estudio de procesos físicos o método morfológico.

Etapa III: Definir y formalizar los parámetros de diseño (DPs)



Durante la identificación de los parámetros de diseño (DPs), la información debe ser definida y formalizada. Para definir los parámetros de diseño (DPs) se ha propuesto la estructura que tiene que tener un parámetro de diseño (DP). La estructura refleja toda la información que este tiene que contener, y que por ello se tiene que definir.

Para formalizar y documentar estos parámetros de diseño (DPs) se ha proporcionado una matriz que permite explicitar y documentar la información

asociada a cada una de ellos. Además, en esta matriz también se debe documentar la información más relevante que se deriva de la relación con el requerimiento funcional al cual satisface.

a. Estructura de los parámetros de diseño (DPs)

La estructura de los parámetros de diseño (DPs) se fundamenta en la propia naturaleza de las propiedades que definen un producto. Es decir, las propiedades tienen que tomar un valor, cualitativo o cuantitativo, para definir físicamente un producto (Pahl et al., 1996; Chakrabarti y Bligh, 2001). Por consiguiente, el método que se ha propuesto plantea que un DP se compone de dos elementos: una propiedad de producto y una especificación, Figura 3-5 .

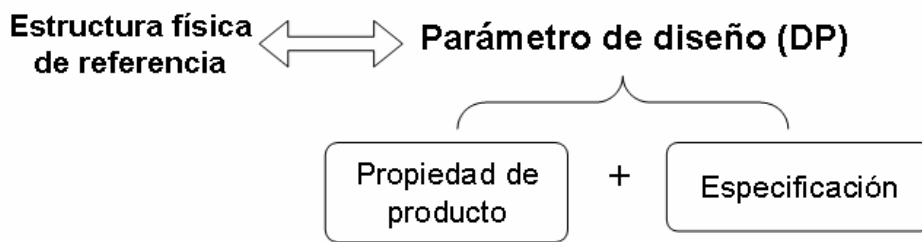


Figura 3-5: Estructura de un parámetro de diseño (DP) para el diseño de componentes

Considerando la relación comentada en la etapa II, entre la estructura física del producto y los parámetros de diseño, la definición de un DP también tiene que llevar asociada la estructura física a la cual hace referencia. Es decir, se debe de formalizar la relación entre la estructura física y el parámetro de diseño que se define para satisfacer las funciones de la

misma, Figura 3-5. Esto significa que en la aplicación de esta metodología que no puede existir ningún DP que no este enlazado con un elemento de la estructura física.

Estructura física

La estructura física, tal y como se define en el apartado 3.2 Glosario de términos, es la materialización de un conjunto de funciones que el producto tiene que satisfacer. La estructura física se representa con un nombre.

Por ejemplo en el caso de la biela se pueden distinguir tres estructuras físicas: la cabeza de la biela, el cuerpo de la biela y el pie de la biela.

Propiedades de producto

Las propiedades de producto, tal y como se define en el apartado 3.2 Glosario de términos, son las propiedades que definen físicamente las estructuras físicas, desde el punto de vista de material, dimensiones, forma y acabado superficial. Las propiedades se representan con un nombre y tienen que tomar un valor, cualitativo o cuantitativo, para definir físicamente estas estructuras (Tabla 3-6, Tabla 3-7 y Tabla 3-8). El cual se denomina la especificación.

Especificación

La especificación representa el valor o conjunto de valores que acompañan a las propiedades de producto y limitan las soluciones del diseño. Dentro de las especificaciones se distinguen varios tipos de valores. Algunos de los tipos más comunes pueden ser: tipo numérico, tipo selección o tipo booleano.

- El tipo numérico permite representar información cuantitativa mediante un valor o un rango de valores numéricos. Por ejemplo el valor de la rugosidad que tiene que tener la preforma de una biela de MCIA, Tabla 3-6.

Propiedad de producto	Especificación	Valor	Unidad	Tolerancia
Rugosidad	Tipo numérico	[8-12,5]	μm	+/-5

Tabla 3-6: Ejemplo de formalización de una propiedad de producto de tipo numérico

- El tipo selección permite representar información cualitativa, mediante la selección de un elemento, como mínimo, dentro de una lista de elementos establecida. Los componentes de esta lista tienen que estar establecidos para que la propiedad pueda tomar valor. Por ejemplo, el tipo de material de una biela de MCIA o el tipo de agujero que se tiene que realizar en la misma, Tabla 3-7.

Propiedad de producto	Especificación	Valor	Posibles elementos de selección
Tipo de material	Tipo selección	Metales de aleaciones ligeras ferrosas	Metales de aleaciones ligeras ferrosas Metales de aleaciones ligeras no ferrosas Cerámicos Termoplásticos
Característica de diseño	Tipo selección	Agujero pasante	Agujero pasante Agujero no pasante Agujero de diámetro variable

Tabla 3-7: Ejemplo de formalización de una propiedad de producto de tipo selección

- El tipo booleano permite representar información entre en dos posibles estados. Por ejemplo (si/no); hay o no hay agujeros en un componente, Tabla 3-8. Los estados del tipo booleano tienen que estar establecidos para cada una de las propiedades.

Propiedad de producto	Especificación	Valor	Posibles valores de selección
Agujeros	Tipo booleano	SI	SI / NO

Tabla 3-8: Ejemplo de formalización de una propiedad de producto de tipo booleano

Como se observa en los ejemplos presentados, la formalización de cada uno de los tipos varía en función de la información que tienen que representar.

El tipo de la especificación se define durante la búsqueda de los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen los requerimientos funcionales (FRs). En algunas ocasiones el propio método de búsqueda indica los tipos de los valores que estos pueden tomar. Por ejemplo el “área” que hay que definir para “soportar una determinada fuerza axial”. En otras ocasiones es el propio diseñador quien define los tipos de los valores de los DPs. Por ejemplo el tipo y los valores del “tipo de sección” de un componente: sección en I, en U o cerrada.

b. Matriz de formalización y representación de los parámetros de diseño (DPs)

Considerando toda la información que puede ir asociada a cada parámetro de diseño (DP), se propone una matriz para su formalización en la Tabla 3-9.

El objetivo de la matriz de formalización es almacenar y documentar de forma explícita y completa toda la información asociada a cada uno de los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen los requerimientos funcionales (FRs). Por este motivo la matriz refleja la estructura física y el parámetro de diseño (DPs) que satisfacen al menos a un FR.

La información para completar esta matriz se obtiene tras identificar la información de la estructura que se ha propuesto para definir un DP. Los valores de las especificaciones de

las propiedades de producto deben añadirse en la medida que se vayan definiendo, pues estos valores se definen y se refinan a la medida que el diseño avanza.

Requerimiento funcional		FR12
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Espesor mínimo de la sección
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	8
	Unidades	mm
	Tolerancia	0/+0,04
Descripción		Este DP se ha obtenido del <ul style="list-style-type: none"> - Análisis estático de tracción/compresión - Análisis estático de pandeo - Análisis de fatiga

Tabla 3-9: Matriz de formalización de un parámetro de diseño (DP) de una biela de MCIA

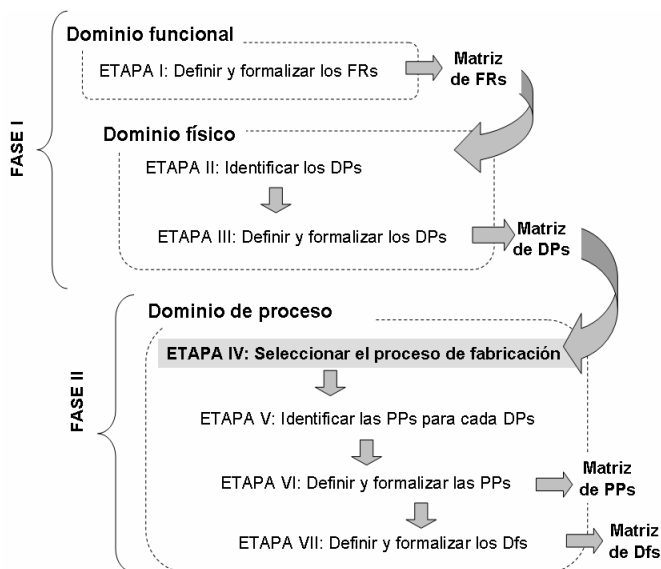
En la matriz de formalización también se ha planteado documentar la relación del parámetro de diseño con el requerimiento funcional, la cual se define con la descripción de la relación.

- La descripción representa los aspectos claves del procedimiento que ha permitido obtener el parámetro de diseño que satisface ese requerimiento funcional. Estos aspectos claves son aquellos que se deberían de tener en cuenta para redefinir el valor de dicho parámetro de diseño, satisfaciendo ese mismo requerimiento funcional.

3.4.2.2. Fase II: Definición de la información de los procesos de fabricación

Dominio proceso

Etapa IV: Elegir el proceso de fabricación.



La primera etapa antes de iniciar el dominio de proceso es elegir el proceso de fabricación que se pretende estudiar. Este proceso de fabricación será el proceso de estudio del cual se buscará la información para DFM.

La decisión sobre el proceso de estudio puede estar impulsada por dos razones.

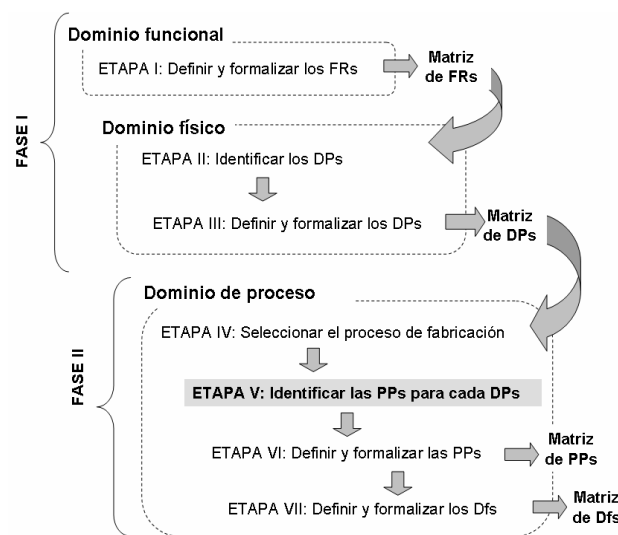
1. La primera, porque es un proceso técnicamente viable para el diseño que

se está desarrollando. Es decir, el resultado obtenido después de haber hecho una selección preliminar de los procesos de fabricación, partiendo de los requerimientos de producto. Por ejemplo el resultado de la selección que se puede obtener mediante la herramienta de selección CES Selector (Esawi y Asbhy, 2000)

2. La segunda, por el interés que puede tener el diseñador en capturar y formalizar la información de un determinado proceso para DFM. Este interés puede ser impulsado: porque es un proceso que se usa normalmente para un determinado componente, porque es un proceso que existe en su entorno o porque es un proceso totalmente desconocido. Pero en cualquier caso, es un proceso de fabricación que puede tener interés en un futuro para dicho diseño o para el diseñador.

Partiendo del proceso elegido, el objetivo es capturar y formalizar la información necesaria del proceso que debería estar disponible en el diseño para aplicar el concepto de diseñar para fabricar (DFM). Como se ha comentado en el apartado 3.4.1, esta información de proceso corresponde principalmente con las propiedades del proceso (PPs) que pueden afectar a los parámetros de diseño (DPs). Aunque también se han incorporado los defectos de fabricación (Dfs) que pueden afectar sobre dichos DPs.

Etapa V: Identificar las propiedades de proceso (PPs) para cada parámetro de diseño (DPs)



Tomando los parámetros de diseño (DPs) definidos y formalizados en la etapa III, en esta etapa hay que identificar las propiedades del proceso de estudio (PPs) que pueden afectar para obtener dichos DPs.

Un primer paso indispensable para llevar a cabo esta etapa es adquirir conocimiento del proceso de fabricación que se está estudiando. Este conocimiento puede provenir de la propia experiencia del diseñador, de expertos de fabricación, de documentación o prácticas internas, o de literatura especializada en dicho proceso.

Cuando el conocimiento sobre el proceso ya ha sido adquirido, un segundo paso es analizar los parámetros de diseño (DPs) que pueden estar afectados, o no, por el proceso de fabricación. El resultado de ello será una lista de DPs afectados por el proceso de fabricación. Los DPs que no están afectados quedan excluidos de la metodología.

Disponiendo de la lista de DPs afectados, ya se puede iniciar la búsqueda de las propiedades del proceso (PPs). Considerando que esta segunda fase de la metodología se puede aplicar a más de un proceso de fabricación para un mismo diseño, se proponen dos procedimientos para identificar las propiedades del proceso (PPs): el procedimiento de primera aplicación (Figura 3-6) y el procedimiento de aplicación repetida (Figura 3-7).

El primero de ellos, permite identificar las propiedades del proceso (PPs) cuando la metodología es aplicada al primer proceso de fabricación, denominado el proceso de fabricación inicial (P_i). El segundo de ellos, permite identificarlas cuando la metodología es aplicada a procesos de fabricación posteriores, llamado cada uno de ellos proceso de fabricación no inicial (P_{ni}). Este segundo procedimiento considera los resultados obtenidos de aplicar el primer procedimiento al proceso inicial (P_i) para capturar las propiedades de los procesos posteriores (P_{ni}).

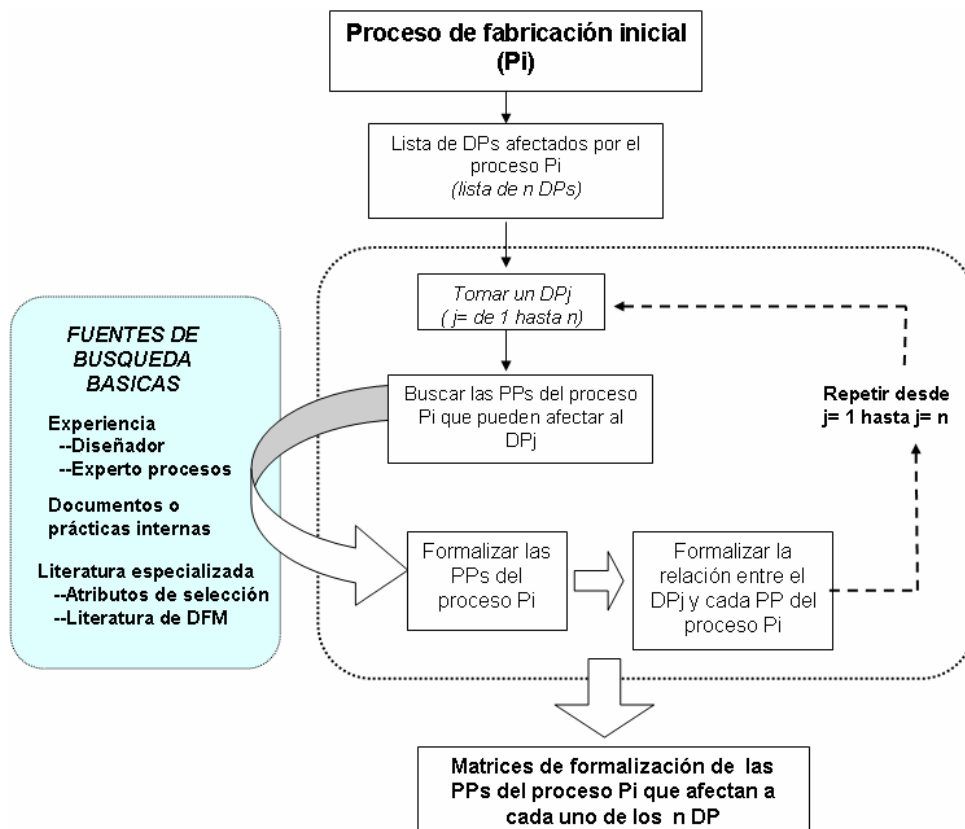


Figura 3-6: Procedimiento de primera aplicación para obtener las propiedades del proceso (PPs) para el proceso de fabricación inicial (P_i)

a. Procedimiento de primera aplicación.

El procedimiento de primera aplicación se esquematiza en la Figura 3-6. En dicha figura se observa que para cada uno de los parámetros de diseño (DPs) afectados por el proceso

inicial (P_i), las propiedades del proceso (PPs) se pueden obtener de tres fuentes básicas: la propia experiencia del diseñador y/o del experto de fabricación, de documentación o prácticas internas, o de literatura especializada en dicho proceso. Aunque en la Figura 3-6 se propone una secuencia de búsqueda dentro de estas fuentes, el orden de la misma puede variar dependiendo de la preferencia del usuario. No obstante, si que se requiere de analizar todas las fuentes con el fin de obtener todas las propiedades (PPs) del proceso inicial (P_i) que pueden afectar a cada parámetro de diseño (DP_j). Cuando todas las PPs han sido identificadas deben formalizarse, así como también debe formalizarse su relación con el DP_j correspondiente. Estos métodos de formalización se exponen en la etapa IV de la metodología. El resultado del procedimiento de primera aplicación son el conjunto de matrices de formalización de las propiedades del proceso (PPs) del proceso inicial (P_i) que pueden ser relevantes para cada uno de los n DPs afectados por dicho proceso. .

b. Procedimiento de aplicación repetida

Cuando la metodología ha sido aplicada al primer proceso de fabricación (P_i) y las propiedades de dicho proceso (PPs) ya han sido formalizadas, se pueden utilizar estos resultados para buscar las propiedades (PPs) de otros procesos de fabricación no iniciales (P_{ni}).

El procedimiento de aplicación repetida se esquematiza en la Figura 3-7. En dicha figura, inicialmente, se compara los parámetros de diseño (DPs) afectados por el proceso no inicial (P_{ni}) con los DPs afectados por el proceso inicial (P_i). Para los parámetros de diseño (DPs) que no son coincidentes, las propiedades (PPs) del proceso no inicial (P_{ni}) se obtienen utilizando el procedimiento de primera aplicación. Para los parámetros de diseño (DPs) coincidentes se toma un parámetro de diseño (DP_k) y se plantea si el proceso no inicial (P_{ni}) puede afectar al DP_k con las mismas propiedades de proceso (PPs) que el proceso inicial (P_i). En caso negativo se debe utilizar el procedimiento de primera aplicación para identificar las propiedades (PPs) del proceso no inicial (P_{ni}). En caso afirmativo, se adopta la misma formalización de las PPs del proceso inicial y se buscan los valores de las propiedades de proceso (PPs) para el proceso no inicial. El resultado de esta acción es el conjunto de matrices de formalización de las propiedades de proceso (PPs) del proceso no inicial (P_{ni}) que afectan a cada DP_k .

Posteriormente al desarrollo de las matrices, en la Figura 3-7 también se plantea la posibilidad de que pueda existir más PPs del proceso no inicial que afectan a cada DP_k , pero que sean diferentes a las PPs del proceso inicial. En tal caso se utiliza el procedimiento de primera aplicación para identificarlas y las propiedades de proceso obtenidas se almacenan junto con las matrices de formalización que afecta a cada parámetro de diseño (DP_k).

El resultado este procedimiento de aplicación repetida son el conjunto de matrices de formalización de las propiedades del proceso (PPs) del proceso no inicial (P_{ni}) que pueden ser relevantes para cada uno de los m DPs afectados por dicho proceso. .

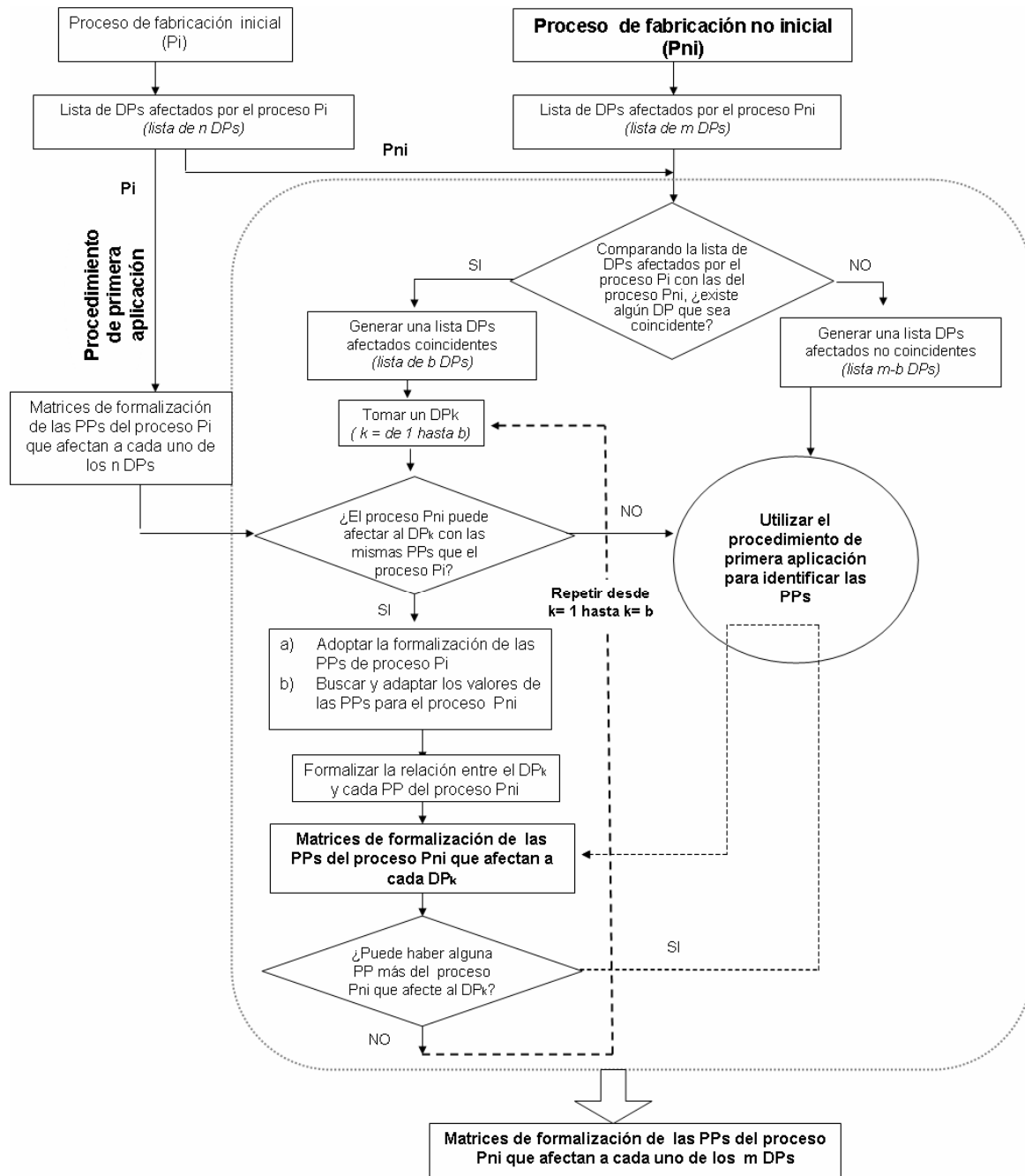
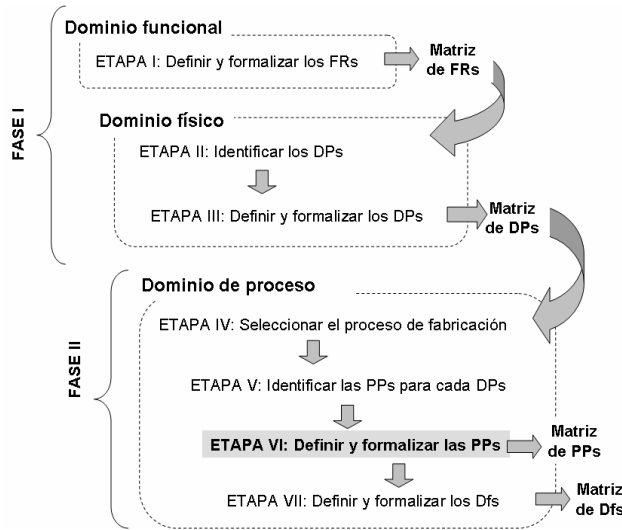


Figura 3-7: Procedimiento de aplicación repetida para obtener las propiedades del proceso (PPs) para un proceso de fabricación no inicial (Pni)

Como requerimientos básicos de esta etapa, destacar lo siguiente:

1. Cuando un parámetro de diseño (DP) está afectado por el proceso, como mínimo debe identificarse una propiedad del proceso (PPs).
2. Un parámetro de diseño (DP) puede estar afectado por más de una propiedad de proceso (PPs).
3. En la aplicación de esta metodología, una propiedad de proceso (PP) siempre tiene que ir asociada a un parámetro de diseño (DP)

Etapa VI: Definir y formalizar las propiedades de proceso (PPs)



Paralelamente a la búsqueda de las propiedades de los procesos (PPs), estas propiedades deben definirse y formalizarse.

Para definir las propiedades de los procesos (PPs) se ha propuesto la estructura que tienen que tener una propiedad de proceso (PP). Para formalizar y documentar estas propiedades se ha planteado una matriz de documentación y formalización que permiten explicitar y documentar la información asociada a cada propiedad del proceso (PP). Además, en esta matriz también se ha sugerido documentar la

información más relevante que se deriva de la relación con parámetros de diseño (DP) al cual afecta.

a. Estructura de las propiedades de proceso (PPs)

La estructura de una propiedad de proceso (PP) se fundamenta en la estructura utilizada para definir los atributos de la selección de procesos, expuestas en el apartado 2.3.1. Aunque la selección de procesos no hace explícita ninguna estructura para definir los atributos, se puede extraer que los atributos se definen con un nombre y un valor, cualitativo o cuantitativo (Ishii et al., 1991; Boothroyd et al., 2002; Esawi y Ashby, 2003; Swift, 2003). Considerando que las propiedades de los procesos (PPs) incluyen algunos atributos de selección, además de información más específica de cada proceso que también puede afectar al diseño, se puede adoptar la misma estructura que los atributos de selección para definir las PPs. Razón por la cual, la estructura de una propiedad de proceso (PP) se compone de dos elementos: un nombre de la propiedad de proceso y una especificación.

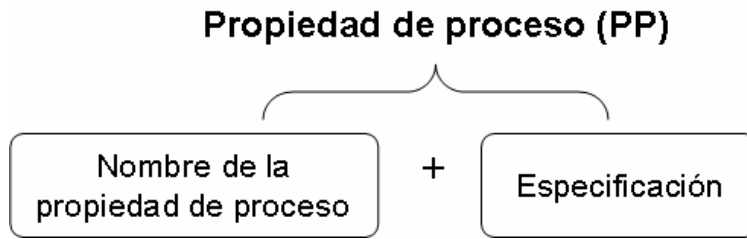


Figura 3-8: Estructura de una propiedad de proceso (PP)

- El nombre de la propiedad de proceso representa la propiedad del proceso (PP) que puede afectar para obtener las propiedades del producto (DPs). Se expresa con un nombre
- La especificación representa el valor o conjunto de valores que acompañan a la propiedad y declara la limitación del proceso para obtener los DPs. Esta limitación puede ser cuantitativa o cualitativa. Siguiendo el mismo patrón que las especificaciones de los parámetros de diseño (DPs), comentadas en la etapa III, la especificación de las propiedades de los procesos también puede ser de varios tipos. Los tipos de información más comunes que representan la información de los procesos son: tipo numérico, tipo selección y tipo boleano. Las definiciones de cada uno de estos tipos ya han sido expuestas en la etapa III.

Algunos ejemplos de la formalización de cada uno de estos tipos para las propiedades del proceso (PPs) se muestran en la Tabla 3-10, Tabla 3-11 y Tabla 3-12 .

Propiedad de proceso	Especificación	Valor	Unidad	Tolerancia
Rugosidad	Tipo numérico	[3,2-12,5]	µm	+/- 0,2

Tabla 3-10: Ejemplo de formalización de una PP de tipo numérico para el proceso de forja en matriz cerrada

Propiedad de proceso	Especificación	Valor	Posibles valores de selección
Tipo de sección principal	Tipo selección	Sólida Abierta con agujero	Sólida Cerrada con agujero Abierta con agujero
Característica de diseño	Tipo selección	Agujero no pasante Cajera rectangular	Agujero no pasante Agujero pasante Cajera rectangular

Tabla 3-11: Ejemplo de formalización de una PP de tipo selección para el proceso de forja en matriz cerrada

Propiedad de proceso	Especificación	Valor	Posibles valores de selección
Agujeros	Tipo boleano	SI	SI / NO

Tabla 3-12: Ejemplo de formalización de una PP de tipo boleano

El tipo de la especificación de cada propiedad depende del modo en que la información de procesos está disponible. Estos tipos se pueden obtener de las mismas fuentes que se ha comentado anteriormente para identificar las propiedades de los procesos (PPs): la propia experiencia del diseñador y/o del experto de fabricación, de documentación o prácticas internas, o de literatura especializada en dicho proceso.

En las propiedades del proceso (PPs) es importante especificar el rango de valores que cada propiedad puede tomar, pues forma parte de la información que debería estar disponible en el diseño para DFM. En esta tesis se ha utilizado los valores generales que cada propiedad de proceso (PP) puede tomar. No obstante, la mayoría de estos valores de las PPs son dependientes. Es decir, el rango de valores de cada propiedad de proceso (PP) puede variar en función del valor de los parámetros de diseño (DPs) del componente o en función de las variables de ejecución del proceso (EVs) que son controladas durante la fabricación. Por ejemplo, el rango de valores del ángulo de desmoldeo depende del tipo de material (Tabla 3-13), mientras que la rugosidad de una pieza forjada depende de la condiciones de procesado.

Material	Angulo de desmoldeo
Aluminio	0-2°
Magnesio	0-2°
Latón	0-3°
acero	5-7°
Acero inoxidable	5-8°
Titanio	5-6°

Tabla 3-13: Variación del valor del ángulo de desmoldeo en función del material para el proceso de forja en matriz cerrada (Bralla, 1999)

Por este motivo en este trabajo también se ha considerado importante, como mínimo, identificar cuales son algunas de estas dependencia que pueden hacer variar los valores generales que están disponibles de las PPs. Consecuentemente, la definición de las propiedades de proceso (PPs) deberá incluir: el nombre de la propiedad, la especificación, los valores o rango de valor que pueden tomar y las dependencias que pueden modificar dichos valores.

b. Matriz de formalización y representación de las propiedades de proceso (PPs)

La matriz de formalización permite expresar de forma explícita la información de la propiedad del proceso (PP) que puede afectar para obtener el parámetro de diseño (DP).

Esta matriz es específica para cada PP, e incluye el parámetro de diseño (DP) al cual puede afectar y la formalización de la información asociada al mismo, Tabla 3-14.

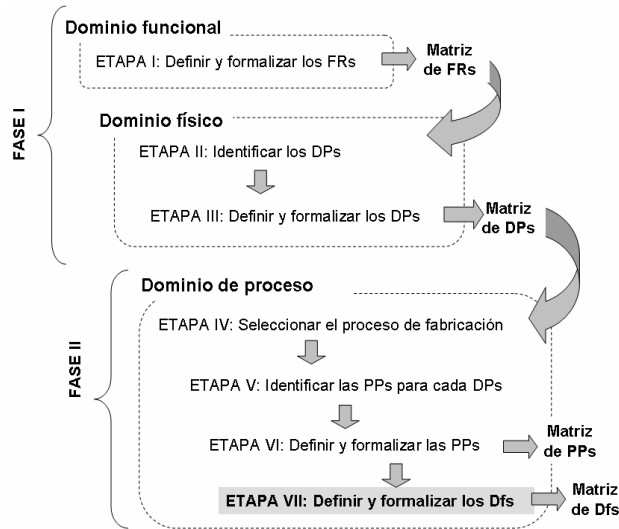
Propiedad de diseño (DP)		Espesor mínimo en sección
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Rango de espesor
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	[3-250]
	Unidades	mm
	Tolerancia	+/- 0,5
	Dependencias	Material
Descripción		Esta propiedad especifica el rango de espesores que el proceso es capaz de obtener
Tipo de relación		Principal

Tabla 3-14: Matriz de formalización de una propiedad de producto (PPs) para el proceso de forja en matriz cerrada

Desde el punto de vista de la relación entre el parámetro de diseño (DP) y la propiedad de proceso (PP) también se ha introducido la información asociada con su relación, la cual incluye: la descripción de la relación y el tipo de relación.

- La descripción de la relación especifica cómo afecta la propiedad del proceso (PP) al parámetro de diseño (DP). Por ejemplo, la descripción de la relación entre la anisotropía y las propiedades mecánicas de diseño es: que la anisotropía genera que las propiedades mecánicas en la dirección de la deformación sean más altas que en la dirección perpendicular a la misma.
- El tipo de la relación especifica cuánto afecta la propiedad del proceso al parámetro de diseño. Es decir el grado de relación entre ambos. En este trabajo se han definido dos tipos de relación: primaria y secundaria
 - El tipo de relación primaria se establece cuando el no cumplimiento de la propiedad del proceso (PP) invalida el proceso de fabricación para obtener un DP. Por ejemplo, la relación entre el tipo de material de diseño y el tipo de material que el proceso es capaz de procesar es primaria, porque si el diseño es de un material que el proceso no es capaz de fabricar, dicho proceso queda anulado.
 - El tipo de relación secundario se establece cuando ese DP puede ser conseguido con otros procesos u operaciones secundarias. Por ejemplo, generalmente, los elementos característicos, como son los agujeros, pueden ser conseguidos con operaciones secundarias.

Etapa VII: Definir y formalizar los defectos de fabricación



Un defecto de fabricación (Df) se define como un fallo de conformado que evita el cumplimiento de un parámetro de diseño necesario para satisfacer los requerimientos del producto (Committee under ASM direction, 1997). Para definir los defectos de fabricación se propone la información asociada a un defecto, es decir su estructura, y una matriz de formalización.

Un defecto se define mediante el nombre del defecto, el proceso de fabricación que puede originarlo y

las variables de ejecución del proceso (EVs) que pueden resultar las principales responsables de dicho defecto (Committee under ASM direction, 1988), Tabla 3-15

La matriz de formalización de un defecto de fabricación debe contener esta información, además del parámetro de diseño (DP) al cual puede afectar, la descripción del defecto y el tipo de relación del defecto (Df) con el DP. La descripción y el tipo de relación corresponden con las mismas definiciones establecidas para las propiedades de proceso (PPs).

Propiedad de diseño (DP)		Defectos de la pieza
Defecto de fabricación	Nombre del defecto	Reventones internos
	Proceso de fabricación	Forja en matriz cerrada
	Variables de ejecución (EVs)	Baja temperatura de trabajo Deformación excesiva
Descripción		Reventones o roturas internas que se producen el interior del material
Tipo de relación		Primaria

Tabla 3-15: Matriz de formalización de un defecto de fabricación del proceso de para el proceso de forja en matriz cerrada

3.4.3. Resumen de la metodología

A continuación se expone un diagrama que resume toda la metodología que se ha explicado a lo largo de esta sección, Figura 3-9. En el Anexo I se muestran las diferentes plantillas de las matrices para formalizar de la información que se precisa para aplicar la metodología.

Aplicando esta metodología a los diseños de componentes se consigue:

- Registrar de una manera sistemática y formalizada la información de diseño, concretamente requerimientos funcionales y parámetros de diseño, definida y formalizada en cualquier fase del mismo. Además de tener documentadas las relaciones entre los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño, mediante la matriz de formalización y representación.
- Registrar de una manera sistemática y formalizada la información del proceso que puede afectar para obtener los parámetros de diseño, para los diferentes procesos que son válidos o viables para dicho diseño. Es decir la información de proceso para DFM.

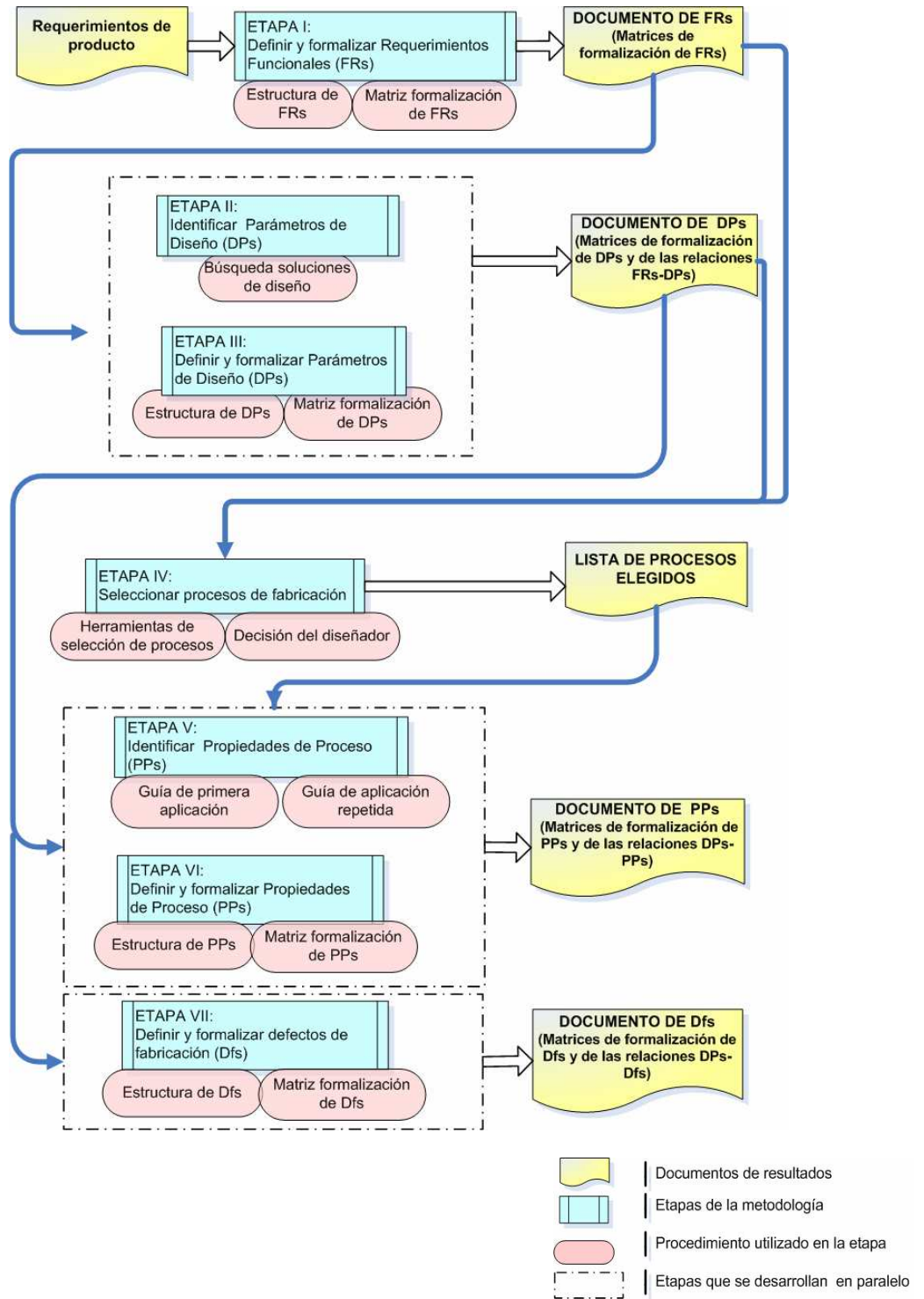


Figura 3-9: Resumen de las etapas de la metodología propuesta

3.5. Prototipo de modelo de información

El resultado de la metodología que se ha expuesto en el apartado 3.4, se ha utilizado para proponer un prototipo de modelo de información. Este prototipo de modelo de información contiene la estructura de los datos para desarrollar una aplicación que permitiría:

1. Asistir al diseñador en el proceso de diseño, en la definición y formalización de la información (funciones y parámetros de diseño),
2. Asistir al diseñador para capturar y formalizar la información necesaria de los procesos que debería estar disponible para DFM en dicho diseño.

Inicialmente el objetivo del modelo estaba centrado exclusivamente en el segundo de estos propósitos citados. No obstante, considerando que para desarrollar la metodología también se ha requerido de definir y formalizar la información de diseño, se ha considerado provechoso complementar el objetivo inicial del modelo con dicha información. Consiguiendo así, el primero de los propósitos citados en este apartado.

El modelo de información se ha definido mediante el Lenguaje de Modelado Unificado (UML) y se ha basado en el modelo de dominio. Un modelo de dominio es una representación visual de las clases conceptuales u objetos del mundo real en un ámbito de interés (Larman, 2004). Este tipo de modelo permite diseñar los objetos software básicos para el diseño de la aplicación. Sin embargo, hay que puntualizar que el modelo desarrollado en esta tesis es un prototipo de modelo de dominio final que permitiría implementar dicha aplicación.

Previamente a la exposición del modelo propuesto se van a introducir los elementos básicos del lenguaje de modelado UML que se han utilizado para definirlo.

3.5.1. Conceptos utilizados de UML

Según (Larman, 2004), utilizando la notación de UML, un modelo de dominio se representa con un conjunto de diagramas de clases en los que no se define ninguna operación. El modelo de dominio permite modelar los conceptos del dominio de la aplicación, así como también otros conceptos internos necesarios para la implementación de la misma. Este modelo es estático, porque no describe el comportamiento del sistema en función del tiempo (Rumbaugh et al., 2000). Los principales elementos del modelo de dominio son: las clases del dominio, sus atributos y las relaciones entre dichas clases (Rumbaugh et al., 2000). Dentro de las relaciones destacar: la asociación, la generalización y varias clases de dependencias, como la agregación compartida.

- Una clase es el descriptor de un conjunto de objetos que comparten los mismos atributos, métodos relacionales y comportamiento. Una clase es un concepto dentro del sistema que se está modelando (Larman, 2004). Por ejemplo los requerimientos funcionales (FRs). Una clase se define mediante: el nombre de la clase, sus atributos y las operaciones, Figura 3-10.

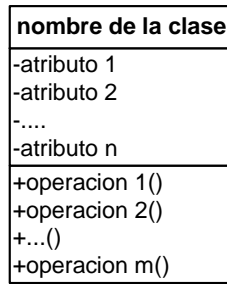


Figura 3-10: Representación de una clase en el lenguaje UML

- Un atributo es una característica o propiedad que es la misma para todas los objetos de una clase (Larman, 2004). Por ejemplo, la “acción” que define una “función” de un “requerimiento funcional”.
- Una operación es una acción o tarea asociada a una clase. Las operaciones no se definen en el modelo de dominio, sino que se definen posteriormente en el modelo de clases.
- Un objeto es el resultado de asignar valores a los atributos de las clases (Larman, 2004). Se conoce también como instancia o ejemplar.
- Una asociación es una descripción de un enlace que relaciona objetos de dos clases. Por ejemplo, un parámetro de diseño (DP) esta asociado con una estructura física. La asociación permite reflejar las condiciones de vínculo entre las dos clases, es decir como se relacionan. Por ejemplo: 1 es a * (muchos). La representación en UML se muestra en la Tabla 3-16.

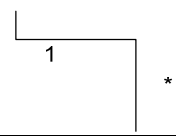
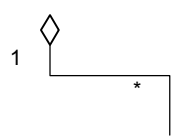
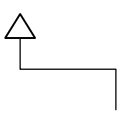
Elemento del modelo	Representación gráfica en UML
Asociación	
Agregación compartida	
Generalización	

Tabla 3-16: Representación gráfica de las relaciones utilizadas en UML

- Una clase asociación es una asociación y una clase al mismo tiempo. Es decir, permite relacionar objetos de dos clases, y también asignar atributos y operaciones a dicha relación (Rumbaugh et al., 2000). Por ejemplo la relación entre FRs y DPs. Una clase se define mediante: el nombre de la clase de asociación, sus atributos, las operaciones y las relaciones en los extremos, Figura 3-11.

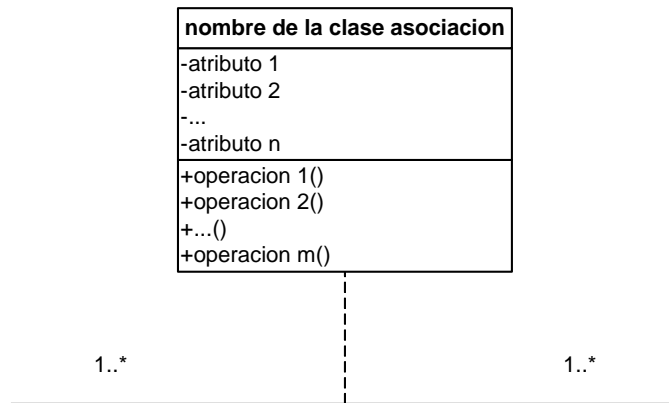


Figura 3-11: Representación de una clase de asociación en el lenguaje UML

- Clase abstracta: es una clase que no puede crear ningún objeto por sí misma, salvo como instancia de alguna subclase (Larman, 2004). Una clase abstracta se representa como una clase pero con el nombre de la clase en cursiva.
- La agregación compartida es la definición de una clase en que cada objeto consta de otros objetos (Larman, 2004). Por ejemplo un FR se compone de una función y, como mínimo, de un calificador. La representación de la agregación compartida en UML se muestra en la Tabla 3-16.
- La generalización es una relación taxonómica general entre un elemento más general y un elemento más específico. El elemento más específico es completamente consistente con el elemento más general y contiene información adicional (Rumbaugh et al., 2000). Por ejemplo los diferentes tipos de especificaciones de los parámetros de diseño (DPs). La representación de la generalización en UML se muestra en la Tabla 3-16.

3.5.2. Modelo de información propuesto

El modelo de información que se propone en esta tesis se fundamenta en la información definida y formalizada en la metodología propuesta (apartado 3.4). La estructura de dicha metodología ha permitido identificar los tres subdominios de información que componen el modelo global, lo cual ha dado lugar a tres submodelos: información de diseño, información de los procesos de fabricación, y la relación entre la información de diseño y la información de los procesos de fabricación para DFM, Figura 3-12.

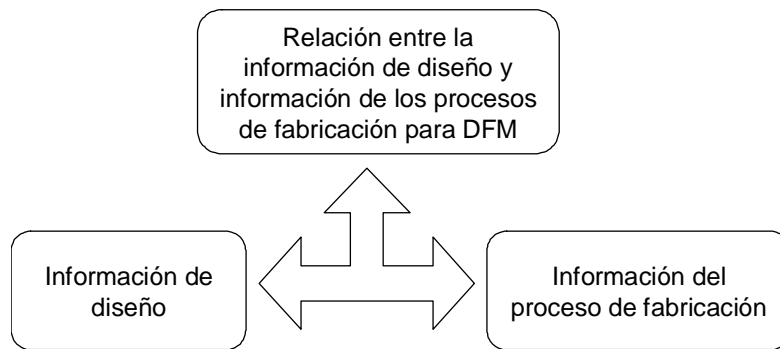


Figura 3-12: Estructura del modelo de información

Submodelo de la información de diseño

El submodelo de la información de diseño contiene la información asociada a los requerimientos funcionales (FRs), a los parámetros de diseño (DPs) y a la relación que existe entre ambos. Para ello se han definido dos clases, la clase *FRs* y la clase *DPs*, y una clase de asociación, *Relacion_FRs-DPs*. La representación de alto nivel de estas clases principales se muestra en la Figura 3-13.

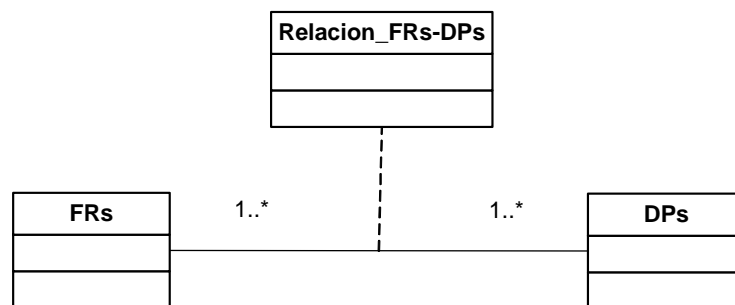


Figura 3-13: Modelo conceptual del submodelo de la información de diseño

- Clase *FRs*

La clase *FRs* se compone de dos clases: *función* y *calificador*, Figura 3-14. La clase *función* se define mediante dos atributos: la *acción* y el *objeto*. La clase *calificador* se define como una generalización de los diferentes tipos de restricciones (Cs) que puede llevar asociada un requerimiento funcional (FRs) y contiene los atributos que permiten definir a cada una de ellas: *Cs_entrada*, *Cs_salida*, *Cs_entorno* y *Cs_diseño*. Tal y como indican las relaciones del submodelo, un FRs lleva asignada una función (1-1) y puede llevar asociados varios calificadores (1-*).

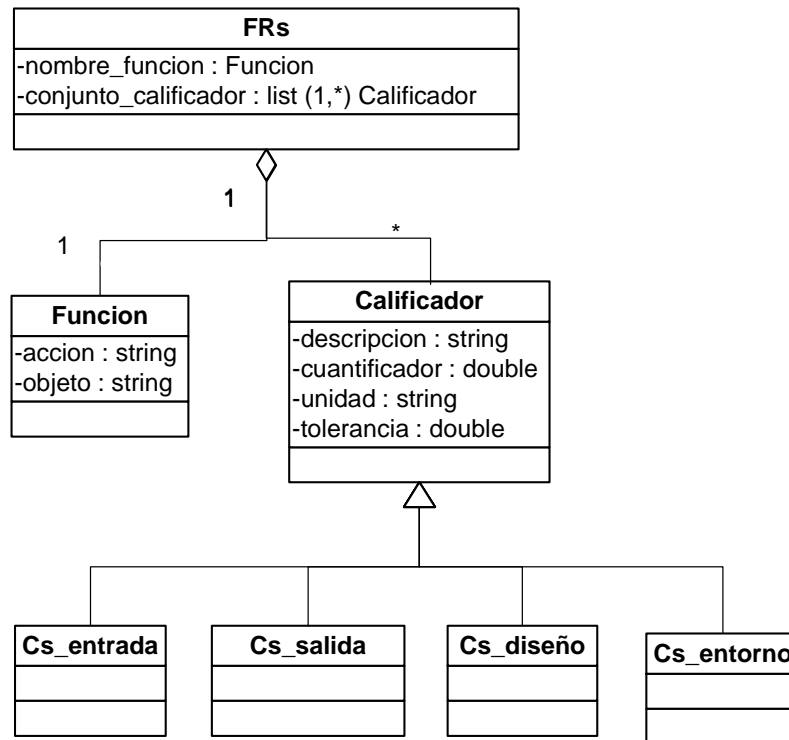


Figura 3-14: Submodelo de información para la clase *FRs*

- Clase *DPs*

La clase *DPs* se compone de dos atributos: *propiedad_producto* y *especificación*, Figura 3-15. El atributo *especificación* puede recibir valores de *tipo_especificación*. El *tipo_especificación* se ha definido como una clase abstracta que engloba los tres tipos de valores (numérico, selección y booleano) que pueden tomar los *DPs*. Una clase abstracta es una clase que se puede utilizar como superclase de alguna otra clase, pero solo puede crear objetos a través de sus subclases o descendientes (Rumbaugh et al., 2000). La relación del submodelo (*-1) muestra que cada *DP* puede llevar asociado un único *tipo_especificación*: *tipo_numerico* o *tipo_seleccion* o *tipo_booleano*, aunque también refleja que los diferentes *tipo_especificación* pueden repetirse para los diferentes *DPs*.

La clase *DPs* también se relaciona con la clase *estructura física*. Pues como se ha comentado en la metodología cada estructura física se compone de diferentes *DPs*. Por consiguiente, la relación que se establece entre ambos, (1-*), refleja que cada estructura física puede estar asociada con varios *DPs*.

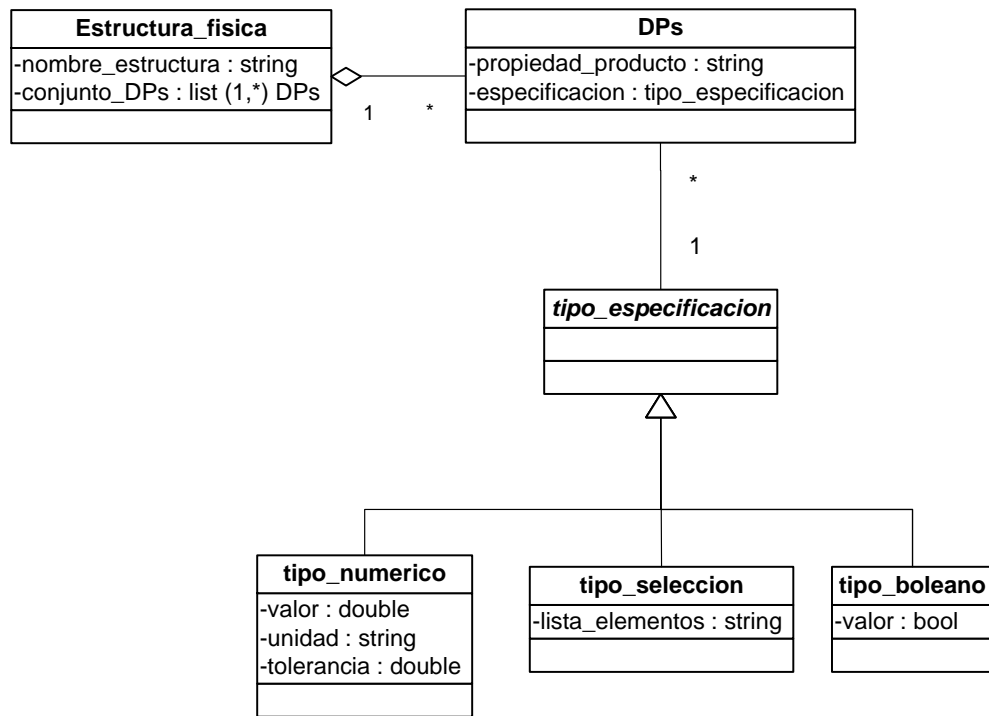


Figura 3-15: Submodelo de información para la clase *DPs*

- Clase de asociación *Relacion_FRs-DPs*

La clase de asociación *Relacion_FRs-DPs* relaciona la clase *FRs* con la clase *DPs*, Figura 3-16. Para ello esta relación contiene los atributos que representan cada una de las clases que se relacionan, *requerimiento_funcional* y *parámetro_diseño*, y los atributos asociados con la relación entre ambos: *descripcion* e *intensidad_relacion*.

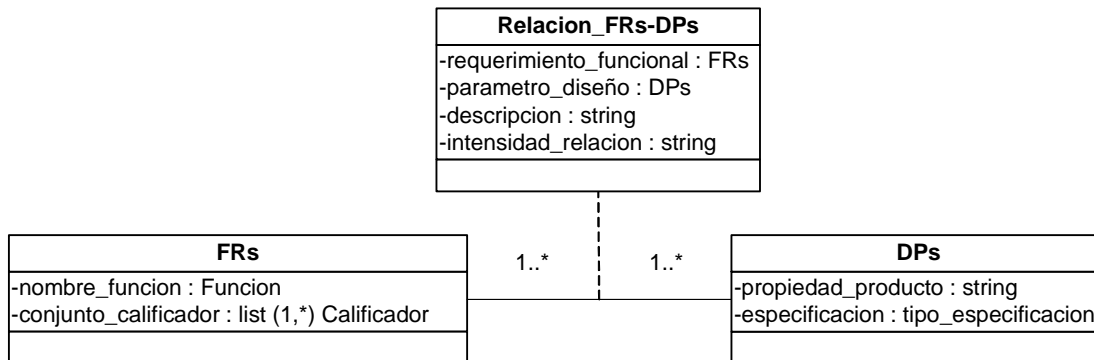


Figura 3-16: Submodelo de información para la clase de asociación *Relacion_FRs-DPs*

Submodelo de la información de los procesos de fabricación

El submodelo de la información de los procesos de fabricación contiene la información necesaria de los procesos para DFM, la cual incluye las propiedades de los procesos (PPs) y los defectos de fabricación (Dfs). Para ello se ha definido la clase *InfoDFM* que se compone de dos subclases que representan dicha información, la clase de *PPs* y la clase de *Dfs*, Figura 3-17. No obstante, considerando que esta información depende de cada proceso de fabricación, en el submodelo se ha generado una clase superior denominada *Proceso_fabricacion*, que permite definir dicha información para cada proceso. Como se observa en la Figura 3-17, la clase *Proceso_fabricacion* se constituye de dos clases: clase *InfoDFM* y la clase *EVs*. La clase *EVs* representa las variables de ejecución del proceso (EVs) que también forman parte de la información de los procesos, aunque no se formalicen en esta tesis. La representación de alto nivel de estas clases principales se muestra en la Figura 3-17.

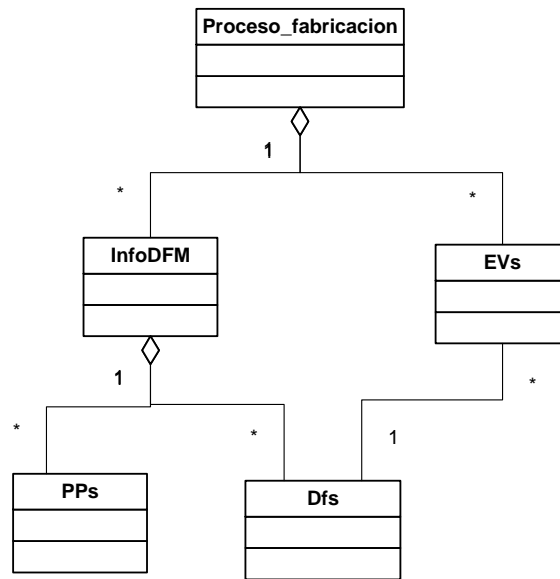


Figura 3-17: Modelo conceptual del submodelo de la información de los procesos de fabricación

La clase *Proceso_fabricacion* se define, como mínimo, mediante el atributo *nombre_proceso_fabricacion* que permite representar a los diferentes procesos de fabricación. Además, contiene dos atributos, *conjunto_infoDFM* y *conjunto_EVs*, que representan el conjunto de información de DFM y el conjunto de EVs que pueden ir asociados a un proceso de fabricación (Figura 3-18). La clase *infoDFM* incluye dos atributos, *conjunto_PPs* y *conjunto_defectos*, que simbolizan el conjunto de PPs y de Dfs que conforman la información de DFM. La clase *EVs* se compone, como mínimo, del atributo *variable_ejecucion* que permite representar el conjunto de variables de ejecución asociadas a dicho proceso.

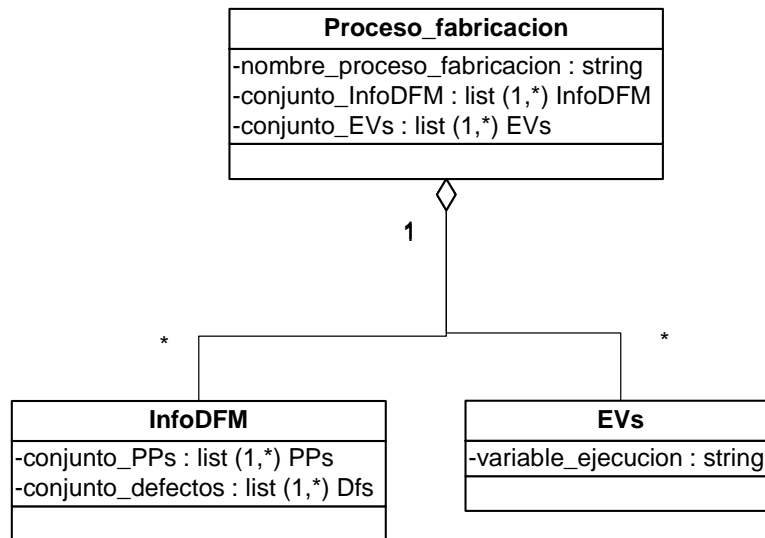


Figura 3-18: Submodelo de información para las clases: *Proceso_fabricación*, *InfoDFM* y *EVs*

- Clase *PPs*

La clase *PPs* se especifica mediante dos atributos: *nombre_propiedad_proceso* y *especificación*, Figura 3-19. El atributo *especificación* puede recibir valores de *tipo_especificación*. El *tipo_especificación* es una clase abstracta que engloba los tres tipos de valores (numérico, selección y boleano) que pueden tomar los *PPs*, del mismo modo que para la clase *DPs*. La relación del submodelo (*-1), muestra que cada *PP* puede llevar asociado un único *tipo_especificación*: *tipo_numerico* o *tipo_seleccion* o *tipo_boleano*, aunque también refleja que los diferentes *tipo_especificación* pueden repetirse para los diferentes *PPs*. Los valores de cada uno de estos tipos dependen de la clase *dependencia*. Esta clase representa el conjunto de propiedades, que incluyen parámetros de diseño y variables de ejecución, que pueden afectar en los valores de las especificaciones de propiedades de los procesos.

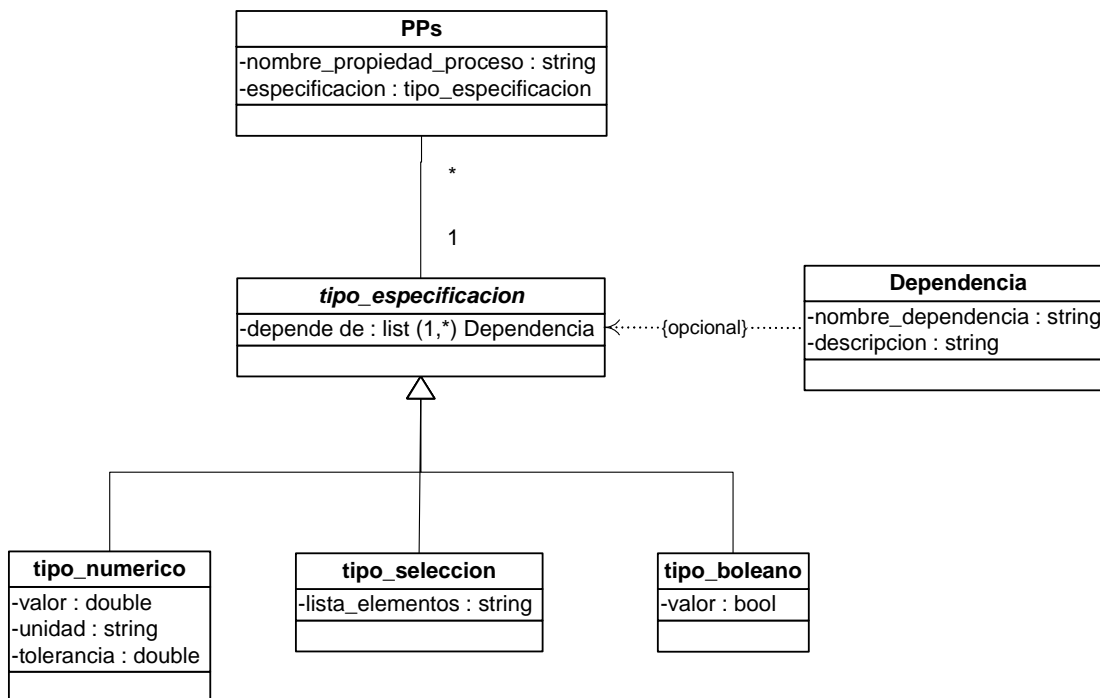


Figura 3-19: Submodelo de información para la clase *PPs*

- Clase *Dfs*

La clase *Dfs* se compone de dos atributos: *nombre_defecto* y *conjunto_EVs*, Figura 3-20. El atributo *conjunto_EVs* es de tipo *list (1,*) EVs*, lo cual simboliza el conjunto de variables de ejecución que hay que controlar para minimizar o evitar dicho defecto de fabricación. Como se observa en el submodelo cada defecto (*Df*) puede estar asociado con varias variables de ejecución (*EVs*), mediante la relación (1-*).

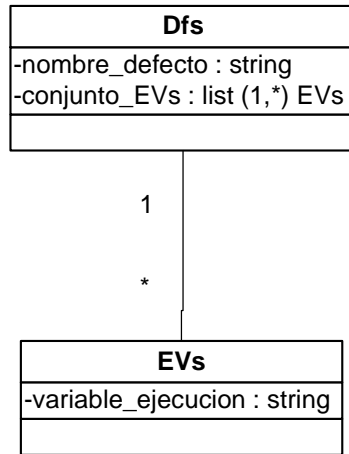


Figura 3-20: Submodelo de información para la clase *Dfs*

Submodelo de la relación entre la información de diseño y la información de los procesos de fabricación para DFM.

Este submodelo contiene la información asociada con la relación entre la información de diseño y la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM. La relación entre dicha información se establece mediante la relación entre los DPs y las PPs, y la relación entre los DPs y los Dfs. Para ello se han definido dos clases de asociación, *Relacion_DPs-PPs* y *Relacion_DPs-Dfs*.

- Clase de asociación *Relacion_DPs-PPs*

La clase de asociación *Relacion_DPs-PPs* relaciona la clase *DPs* con la clase *PPs*, Figura 3-21. Para ello esta relación contiene los atributos que representan cada una de las clases que se relacionan, *parámetro_diseño* y *propiedad_proceso*, y los atributos asociados con la relación entre ambos: *descripcion* y *tipo_relacion*.

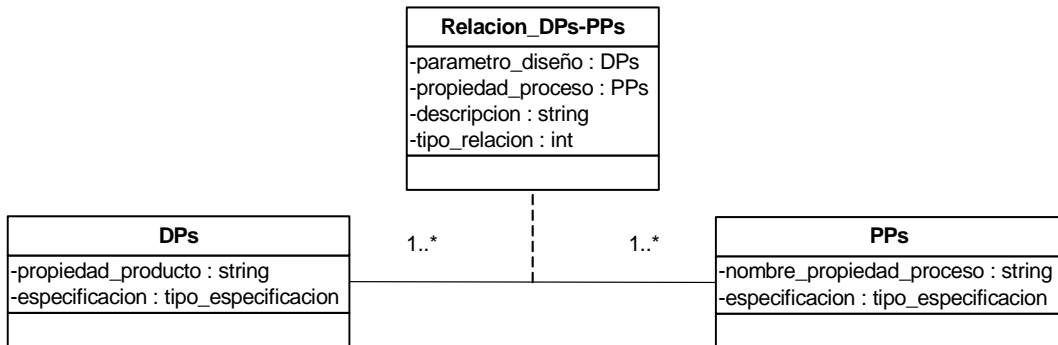


Figura 3-21: Submodelo de información para la clase de asociación *Relacion_DPs-PPs*

- Clase de asociación *Relacion_DPs-Dfs*

La clase de asociación *Relacion_DPs-Dfs* relaciona la clase *DPs* con la clase *Dfs*, Figura 3-22. Para ello esta relación contiene los atributos que representan cada una de las clases que se relacionan, *parámetro_diseño* y *defecto*, y los atributos asociados con la relación entre ambos: *descripcion* y *tipo_relacion*.

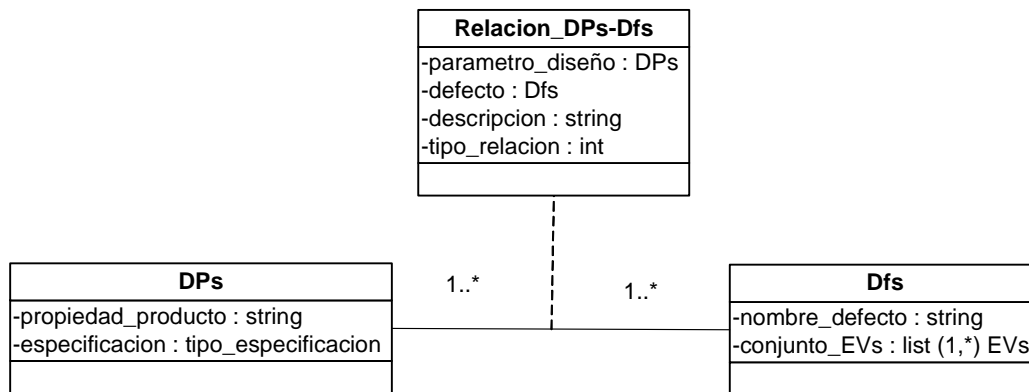


Figura 3-22: Submodelo de información para la clase de asociación *Relacion_DPs-Dfs*

El prototipo de modelo general se expone en la Figura 3-23. Este prototipo de modelo de información sería la base para desarrollar un modelo más completo que permitiera generar una aplicación que pudiera asistir al diseñador durante el proceso de diseño, para definir y formalizar la información de diseño, así como también, para definir y formalizar la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM. Esta aplicación se utilizaría antes de iniciar la definición geométrica en un sistema CAD, permitiría el uso de las herramientas de selección de procesos para elegir los procesos viables para un diseño dado, y utilizaría la información disponible en las técnicas de DFM y el conocimiento de expertos para definir y formalizar la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM.

La captura y almacenaje de la información de modelo permitiría en trabajos futuros desarrollar un sistema experto que fuera capaz de proporcionar información de diseño y de los procesos de fabricación para DFM en nuevos diseños.

El prototipo de modelo de información de la Figura 3-23 se muestra de forma más ampliada en el Anexo II.

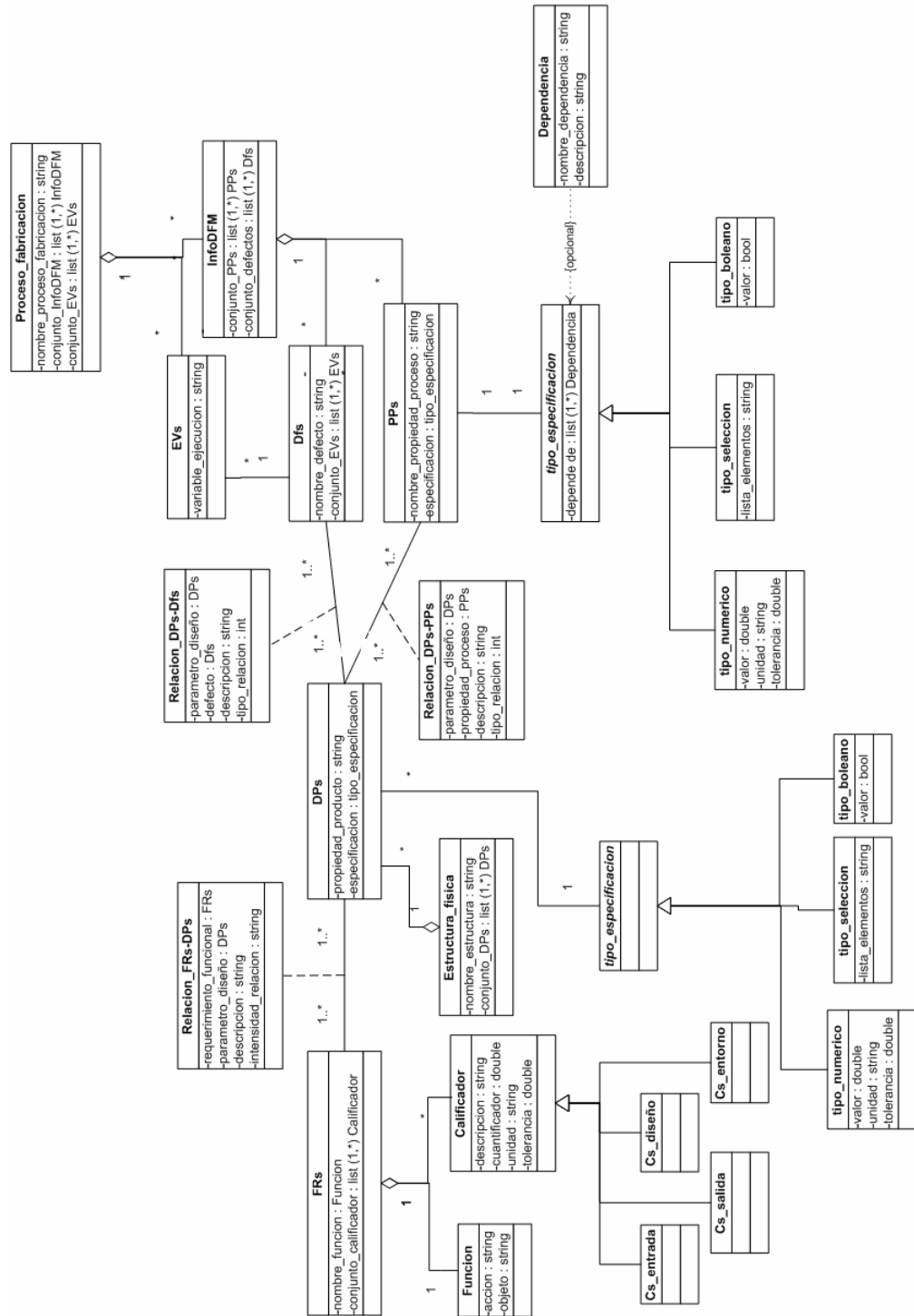


Figura 3-23: Prototipo de modelo de información para definir la información de diseño y la información de los procesos para DFM.

Capítulo 4. Aplicación de la metodología propuesta

La metodología propuesta para identificar y formalizar la información de los procesos que puede ser necesaria conocer durante el proceso de diseño, y que por ello debería estar disponible para DFM, se ha aplicado a un caso práctico. Este caso práctico es la biela que forma parte de un motor de combustión interna alternativo (MCIA).

La aplicación de la metodología a este caso permite alcanzar tres objetivos. El primero de ellos es demostrar la utilización metodología propuesta. El segundo es reflejar las implicaciones de la misma en un diseño real. El tercer objetivo, y último, es validar la metodología propuesta.

4.1. Introducción

La biela que se ha tratado en esta tesis forma parte de un motor de combustión interna alternativo (MCIA). De forma general, un motor de combustión interna alternativo es capaz de transformar la energía generada por la combustión de un combustible en energía mecánica. Dicha energía mecánica se encuentra disponible en forma de un movimiento de rotación, que se caracteriza por su velocidad de giro (min^{-1}) y su par motor (N.m). En los MCIA, tanto en los de cuatro tiempos como en los de dos tiempos, la explosión o inflamación del combustible se produce dentro de un recinto cerrado, denominado cámara de combustión, Figura 4-1. Dentro de la cámara de combustión existe una parte móvil, comúnmente denominada pistón, que se desplaza dentro del cilindro con un movimiento lineal. El pistón está unido a un mecanismo de biela-cigüeñal. Este mecanismo permite

convertir el movimiento lineal del pistón en movimiento giratorio en el cigüeñal y convertir la energía de la combustión en energía mecánica.

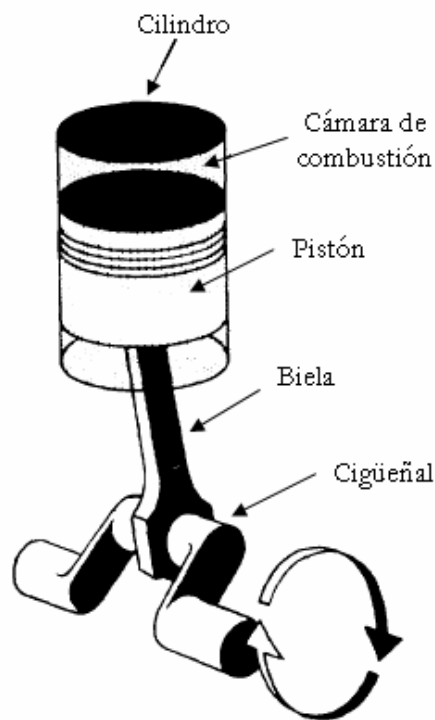


Figura 4-1: Esquema del sistema mecánico interno principal del motor

En los MCIA, el pistón, la biela y el cigüeñal componen el sistema mecánico interno principal del motor. Este sistema es una aplicación típica del mecanismo ampliamente conocido como biela-manivela, Figura 4-2. En el mecanismo biela-manivela existen tres elementos básicos: la corredera, la biela y la manivela.

- La corredera es un cuerpo rígido de movimiento oscilante; rectilíneo en el caso de un MCIA.
- La biela es un cuerpo rígido que tiene movimiento complejo: de rotación y de translación al mismo tiempo.
- La manivela es un cuerpo rígido que realiza revoluciones completas y está conectado a una bancada o sistema fijo.

Este mecanismo tiene un grado de libertad y requiere de ciertas restricciones geométricas básicas para su funcionamiento. Entre ellas la relación entre el desplazamiento del pistón y el radio de giro de la manivela, Figura 4-2.

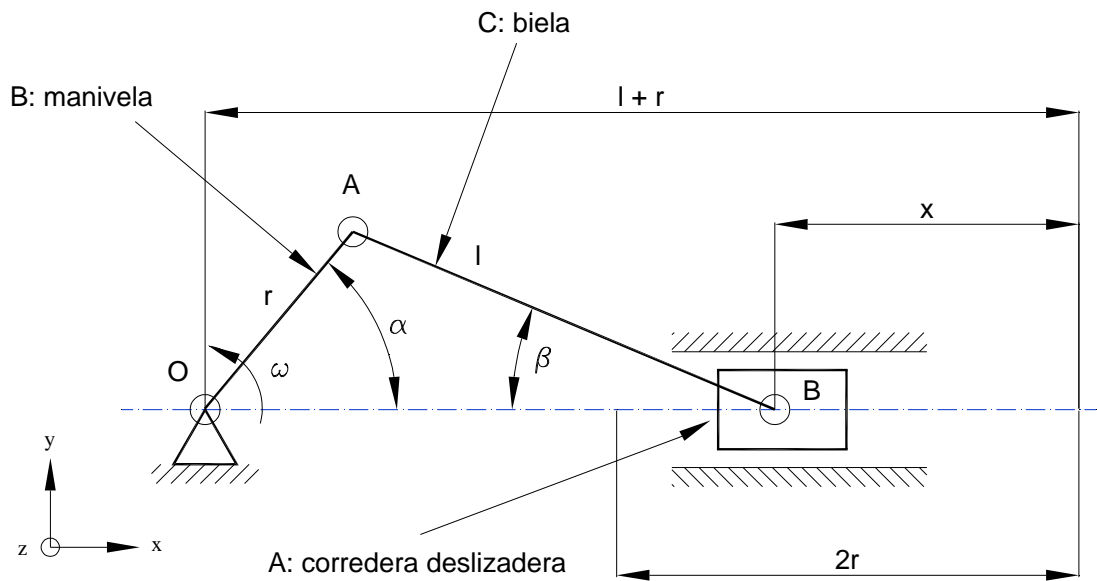


Figura 4-2: Esquema del mecanismo biela-manivela

Dentro del sistema mecánico del motor, los elementos del mecanismo biela-manivela se integran de la siguiente forma, Figura 4-3:

- El pistón representa la corredera del mecanismo. Su trayectoria está definida por el cilindro del motor y se desplaza desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior. Esta distancia se conoce como la carrera del pistón. El pistón es el elemento que recibe directamente el impacto de la combustión de la mezcla.
- La biela, como también se le conoce a la biela en el mecanismo biela-manivela, es el elemento que sirve de unión entre el pistón y el cigüeñal, y por lo tanto, es el que transmite todo el esfuerzo entre ambos. La biela está unida al pistón por medio de un elemento denominado el bulón del pistón. Mientras que el elemento que une la biela y el codo del cigüeñal se conoce como las muñequillas del cigüeñal. En ambas uniones existen cojinete de fricción para evitar el desgaste de los elementos en movimiento.
- La manivela se integra como parte del cigüeñal del motor, mediante el denominado codo del cigüeñal. El codo del cigüeñal es el elemento que junto con la biela y el pistón realiza la transformación del movimiento alternativo en movimiento rotativo. El cigüeñal transmite el giro y fuerza motriz a los demás órganos de transmisión.

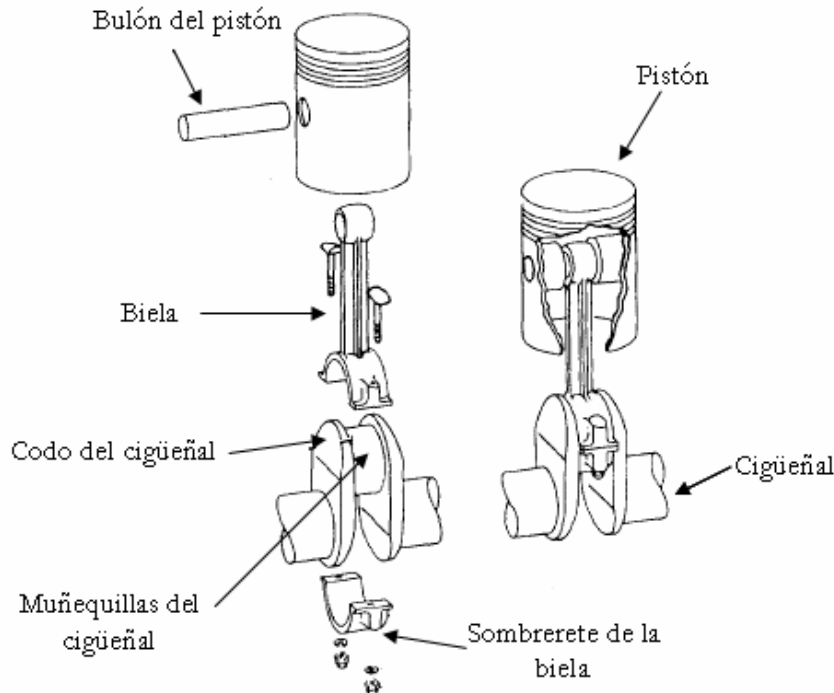


Figura 4-3: Componentes del sistema mecánico interno principal del motor

En esta tesis se considera exclusivamente el elemento biela de este sistema mecánico del motor.

4.2. Biela de un motor de combustión interna

La biela es un elemento del sistema mecánico interno del motor. La biela une el pistón con el cigüeñal y transmite las fuerzas entre ambos (Shenoy, 2004).

A lo largo de los años se han diseñado una amplia variedad de tipos de bielas para ser aplicadas a los motores de combustión interna alternativos. Por ello es conveniente hacer una breve exposición de las mismas para delimitar el tipo de bielas que se tratarán en esta tesis.

4.2.1. Tipos de bielas

De una forma general, las bielas de un MCI pueden ser de dos tipos (Taylor, 1960): simples o múltiples.

- Las bielas simples son las bielas convencionales que se componen de un cuerpo y de dos pernos de conexión, conocidos como el pie y la cabeza de la biela, Figura 4-4. Estas bielas conectan el pistón de un cilindro con el codo cigüeñal. Este tipo de bielas se encuentran en aplicaciones diversas, ya sea en motores industriales, en motores de marina o en motores de pasajeros (Purday, 1962). Aunque su configuración varía dependiendo del tipo de aplicación. Por ejemplo, para

aplicaciones industriales o de marina pesada se requiere que tanto la cabeza como el pie sean partidos, Figura 4-4 (b). Incluso en ocasiones se precisa que el cuerpo sea de tubo redondo para aguantar mejor las torsiones (Purday, 1962) .

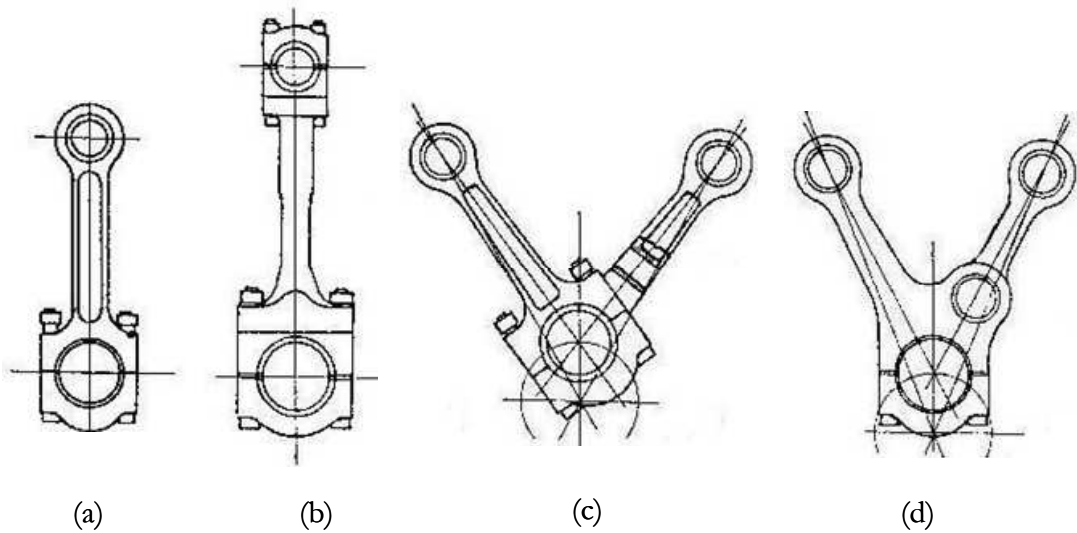


Figura 4-4: Tipos de bielas de un MCI: a) biela de MCI de vehículos de automóvil, b) biela de MCI marina c) y d) biela de MCI especial

- Las bielas múltiples son bielas específicas que se aplican a motores con configuraciones especiales, Figura 4-4 (c) y (d)

En general, el tipo de bielas utilizadas en un motor depende de la disposición de los cilindros y del tipo de motor (Taylor, 1960). Las bielas simples se utilizan en motores con los cilindros dispuestos en línea o en V. Cuando se utilizan en V, se montan dos bielas en una misma muñequilla del codo del cigüeñal.

En esta tesis se van a tratar las bielas simples empleadas en MCI aplicadas en vehículos de automóviles. Por lo tanto la metodología será aplicada a la biela del tipo (a) mostrada en la Figura 4-4.

4.2.2. Análisis dinámico de la biela

Como se ha comentado al inicio del apartado 4.2, la biela tiene dos funciones principales: a) conectar el pistón y el cigüeñal, y b) transmitir la fuerza entre pistón y el cigüeñal. La primera de ellas, la función de conectar, se ha descrito brevemente cuando se ha expuesto la integración de los elementos mecánicos del motor en el sistema biela-manivela, apartado 4.1. La segunda, la función de transmitir, se comentará en esta sección con la finalidad de facilitar el posterior entendimiento de algunos aspectos del diseño de la biela, cuando se aplique la metodología al dominio funcional y al dominio físico.

Para alcanzar este fin es preciso analizar las fuerzas que tienen que ser transmitidas por el sistema mecánico del motor. Esto significa, analizar de forma general la dinámica del

sistema mecánico del motor en un ciclo de combustión. Considerando que un ciclo de combustión en un motor de cuatro tiempos incluye las fases de: admisión, compresión, explosión y escape.

Este análisis se ha tomado de Giacosa (Giacosa, 1988) y por ello se consideran las mismas hipótesis de partida:

1. El análisis se ha realizado para determinar el par motor que se obtiene tras un ciclo de combustión en un sistema monocilindrico.
2. Se considera que la fuerza que actúa sobre el sistema biela-cigüeñal es la resultante de la fuerza del pistón. No se considera el empuje realizado por la inercia de los contrapesos unidos al cigüeñal.
3. En el diseño inicial de la biela no se precisa de considerar las fuerzas de inercia generadas por la aceleración de la masa de la biela.

El sistema biela-cigüeñal tiene que transmitir dos tipos de fuerzas: la fuerza producida por el fluido (líquido y gas) y la fuerza debida a las masas en movimiento (Giacosa, 1988; Shenoy, 2004).

Fuerza producida por el fluido.

La fuerza del fluido (F_f) es originada por la presión que ejerce el fluido (líquido o gas) presente en la cámara de combustión. Esta fuerza tiene un punto máximo en el instante de la combustión y va disminuyendo en los otros ciclos del motor, Figura 4-5. Esta fuerza (F_f) actúa de forma paralela al cilindro, Figura 4-6

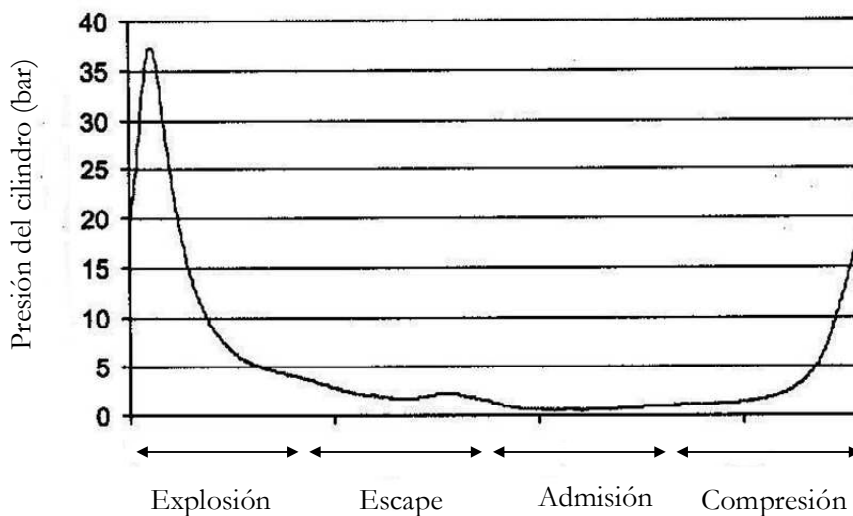


Figura 4-5: Diagrama de la fuerza de gas (fuente de: (Shenoy, 2004))

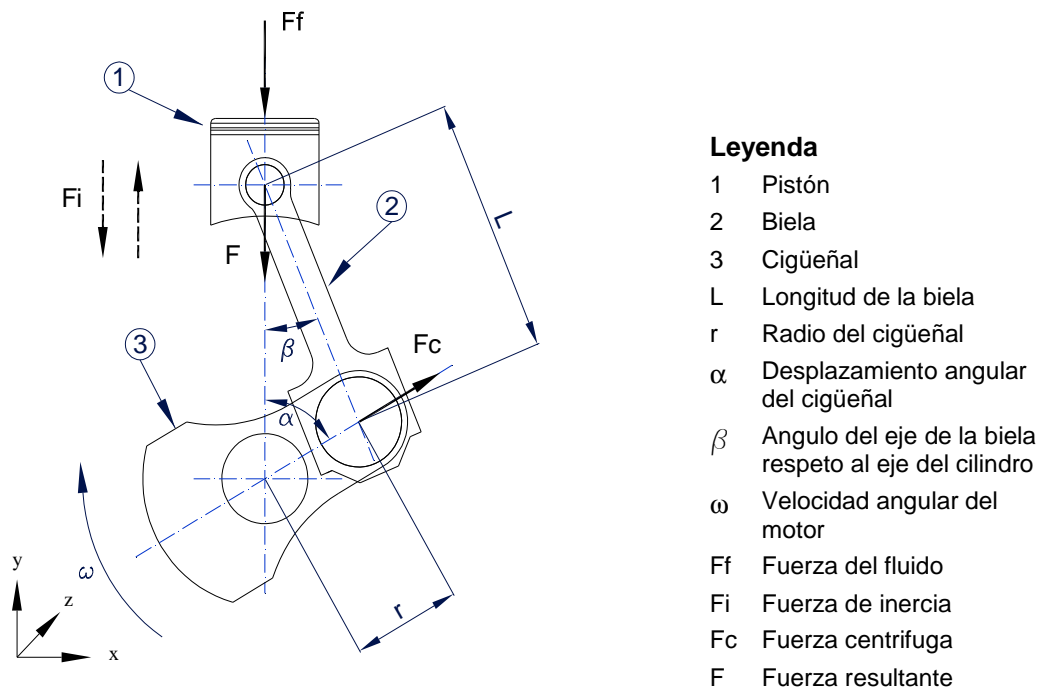


Figura 4-6: Esquema de las fuerzas del sistema pistón-biela-cigüeñal

Fuerza producida por las masas en movimiento.

Las masas en movimiento generan dos tipos de fuerzas: fuerzas de inercia (Fi) y fuerzas centrífugas (Fc), Figura 4-6.

- Las fuerzas de inercia (Fi) están generadas como consecuencia del movimiento alternativo que tienen las masas que están conectadas al pistón. Dentro de estas masas se incluye la masa de: el pistón, el bulón, el pie de la biela y 2/3 partes del cuerpo de la misma. La ecuación que permite calcular la fuerza de inercia (Fi) se compone de las masas en movimiento alternativo (ma) y la aceleración de las mismas (a).

$$Fi = m_a * a \tag{4-1}$$

La fuerza de inercia (Fi) actúa de forma paralela al cilindro y actúan sobre el sistema biela-cigüeñal de forma análoga a la fuerza del fluido (Ff). Como se verá más adelante la resultante para obtener el par motor se obtiene considerando ambas fuerzas.

- La fuerza centrífuga (Fc) está generada como consecuencia del movimiento de rotación de las masas que están conectadas al cigüeñal, Figura 4-6. Dentro de estas masas se incluye la masa de: el codo del cigüeñal, la cabeza de la biela y 1/3 partes del

cuerpo de la misma. La ecuación que permite calcular la fuerza centrífuga (F_c) considera las masas en movimiento rotacional (m_c), el régimen de giro del motor (ω) y el radio de giro del codo del cigüeñal (r)

$$F_c = m_c * \omega^2 * r \quad (4-2)$$

La fuerza de centrífuga es paralela al radio de codo del cigüeñal y por ello no influye en el par motor.

La fuerza resultante (F) que actúa en cada instante sobre el sistema biela-cigüeñal se obtiene de la composición de los valores de la fuerza producida por el fluido (F_f) y de la fuerza alternativa de inercia (F_i) en dicho instante. Según estas componentes estén dirigidas en el mismo sentido o en sentido contrario la fuerza resultante es su suma o su diferencia. Como se observa en la anterior Figura 4-6 esta fuerza está dirigida a lo largo del eje del cilindro.

La representación gráfica de esta fuerza resultante (F) se obtiene de la composición del diagrama de las fuerzas generadas por la presión del fluido con el diagrama de las fuerzas alternativas de inercia, Figura 4-7

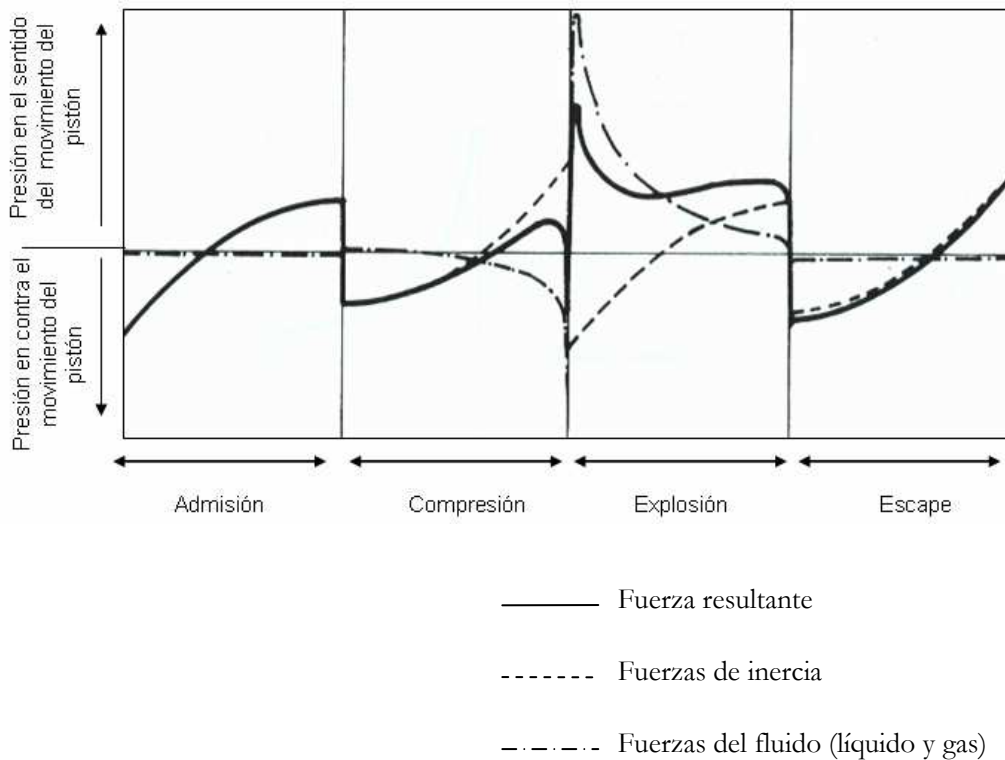


Figura 4-7: Diagrama de fuerzas resultante en el sistema biela-cigüeñal para una velocidad dada (fuente de (Giacosa, 1988))

Analizando las diferentes fases de un ciclo de combustión en la Figura 4-7, se observa que en la fase de admisión se puede considerar que prácticamente actúan la fuerzas de inercia de las masas alternativas, porque la fuerza debido a la ligera depresión que se genera en el cilindro es de magnitud despreciable. En la fase de compresión, el diagrama de las fuerzas de inercia se invierte y la presión del fluido debida a la compresión se opone al movimiento del pistón. En la fase de explosión, se genera la fuerza de la combustión y las fuerzas de inercia se oponen a la presión de la combustión. En la fase de escape, los gases quemados ofrecen una resistencia muy baja al movimiento del pistón y por lo tanto actúan prácticamente las fuerzas de inercia.

Este diagrama de fuerzas resultante varía en función del régimen de giro de motor, Figura 4-8.

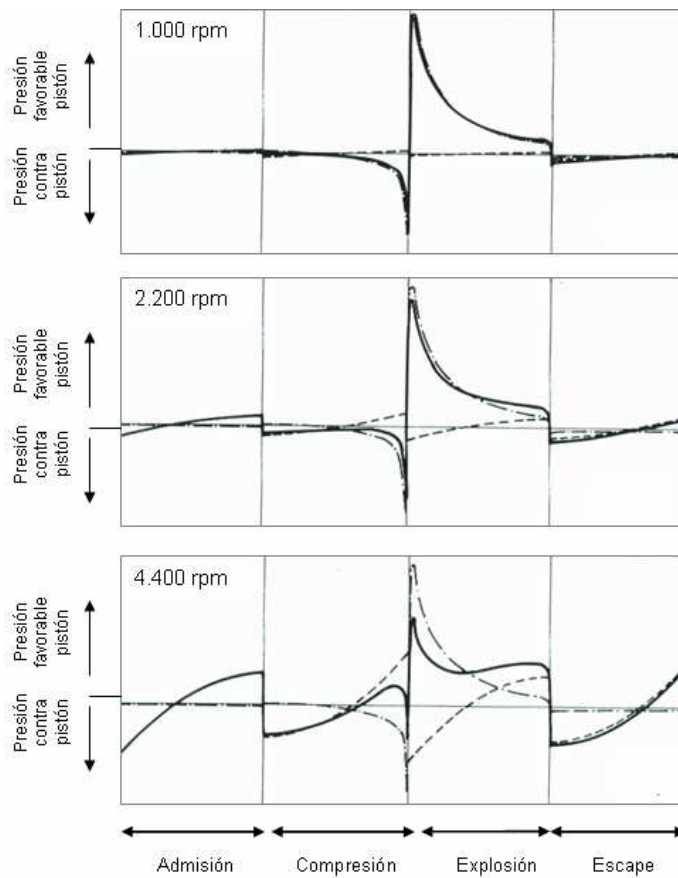


Figura 4-8: Diagrama de fuerzas resultante en el sistema biela-manivela para varios regimenes de giro (fuente de (Giacosa, 1988))

Este análisis ha permitido pone en evidencia algunos aspectos ampliamente conocidos del sistema mecánico del motor. Entre ellos destacar:

- El sistema mecánico del motor, dentro del cual se incluye la biela, está sometido a fuerzas fluctuantes no constantes que generan grandes esfuerzos de fatiga en los componentes de este sistema (Paek et al., 1997; Repgen, 1998; Ilia et al., 2002; Afzal y Fatemi, 2003; Shenoy, 2004)
- Estas fuerzas varían en función de las fases de un ciclo de combustión, la posición del cigüeñal y el régimen de giro del mismo (Giacosa, 1988; Shenoy, 2004)
- Como consecuencia de este estado de carga, el diseño de los elementos del sistema mecánico motor, entre ellos la biela, es realmente complejo y requiere del uso de métodos numéricos, como el análisis de elementos finitos (*Finite Element Methods, FEM*), para conseguir diseños optimizados en peso, coste y fiabilidad o resistencia (Afzal y Fatemi, 2003; Shenoy, 2004)

4.2.3. Formas, materiales y procesos de fabricación de las bielas simples

Analizando con más detalle el tipo de biela objeto de esta tesis se observa que los diseños de las bielas difieren en forma, en materiales y en los procesos de fabricación utilizados.

4.2.3.1. Forma de la biela

Desde el punto de vista de la forma de la biela, se define una clasificación de formas en función del tipo del cuerpo de la misma. De forma general, se establecen dos tipos de bielas en función la forma de su cuerpo: las bielas de tipo I y las bielas de tipo H, Figura 4-9.



Figura 4-9: Tipos de bielas en función de la forma del cuerpo: a) Tipo I convencional y b) Tipo H

Una de las diferencias básicas entre ellas es que las de tipo H pueden proporcionar más potencia con menos peso, en comparación con las de tipo I convencional. Así pues, las de

tipo H se utilizan en motores en los que se quiere alcanzar altas prestaciones de potencia. Mientras que las de tipo I, normalmente, se utilizan en motores convencionales.

4.2.3.2. Materiales de la biela

En términos generales, para el diseño de la biela se está utilizando aleaciones ligeras ferrosas y no ferrosas que proporcionan el mínimo peso con la máxima resistencia. Para proporcionar una definición un poco más concreta sobre el tipo de materiales utilizados en la biela es necesario relacionarlo con los procesos de fabricación que se están utilizando para su fabricación: la forja con matriz cerrada y la forja de polvo de metal. Estos procesos se detallan en la siguiente sección.

Para las bielas forjadas de aleaciones ligeras ferrosas, comúnmente se utiliza el acero AISI 4340 y para ocasiones especiales donde los bloques de motor son grandes se utiliza el acero AISI 5140. Fabricantes como *Eagle Specialty Products*, *Lunati Cams*, *Oliver Connecting Rods* (Oliver Racing Parts, 3w) proporcionan las bielas con este tipo de materiales. Pero también se utilizan otras composiciones químicas de material para este producto forjado, como son el C70S6 (Repgen, 1998) y el Fractim (Corus, 3w). Ambos son variaciones de las aleaciones anteriores para mejorar el partido de la cabeza del cigüeñal de este producto y no necesitar forjar las dos piezas por separado (Corus, 3w)

Para las bielas forjadas de aleaciones ligeras no ferrosas se utiliza el titanio y el aluminio. El titanio usado es Ti-6Al-4V (ARROW precision, 3w) y el aluminio es el 7075-T6 (BME Aluminum Rods, 3w) según la denominación de *Aluminium Association* (AA; L 3710 según UNE).

Para las bielas forjadas de polvo de metal se usan aleaciones metálicas ligeras, equivalentes a los materiales utilizados en forja de matriz cerrada, pero con ciertas variaciones para proporcionar las mismas propiedades mecánicas. Entre estas aleaciones se incluyen, según la denominación de ASTM: el P/F-10C50 (Iliá et al., 2002), P/F-11C59 y P/F-11C47 (Hoffmann et al., 2002)

4.2.3.3. Procesos de fabricación de la biela

Las tecnologías de fabricación que se utilizan más comúnmente para fabricar la preforma de la biela de MCI de automóvil son el forjado con matriz cerrada y la forja de polvo de metal (Committee under ASM direction, 1997; Paek et al., 1997; Afzal y Fatemi, 2003). Como tecnologías asociadas a la realización de operaciones secundarias destacar la tecnología de arranque de viruta (mecanizado) (Paek et al., 1997; Shenoy, 2004), el partido por fractura (*fracture splitting*) (Hoffmann et al., 2002) y ciertos tratamientos superficiales, como chorreo con granalla de carbono (*shoot peening*) para resistir mejor la fatiga (Chernenkoff et al., 1995). Entre esta tesis se trabajará con el forjado con matriz cerrada y la forja de polvo de metal.

No obstante, con la finalidad de no limitar la aplicación de la metodología exclusivamente a los procesos que se están utilizando actualmente para su fabricación, se ha decidido analizar otros procesos alternativos que también podrían ser usados para fabricar este tipo

de bielas. Para ello se ha utilizado la herramienta de selección de procesos CES Selector 4.5v (Esawi y Asbhy, 2000)

a. Selección de procesos de fabricación para la biela

La selección de procesos de fabricación se ha realizado mediante el software CES Selector v4.5. Para ello se ha precisado de disponer de ciertos requerimientos de producto y de considerar ciertas características de los procesos de fabricación dentro de los cuales se pretende seleccionar.

Características de los procesos

CES Selector (Esawi y Asbhy, 2000) permite seleccionar dentro de cuatro grupos de procesos de fabricación: procesos de forma, procesos de acabado, procesos de unión y procesos de tratamientos superficiales. En este caso la selección se ha realizado dentro de los procesos de forma. Pues como ya se ha expuesto, esta tesis se ha centrado en los procesos que proporcionan la preforma a la biela.

En esta herramienta de selección, los procesos de forma se pueden clasificar en primarios, secundarios y terciarios. Los procesos primarios incluyen aquellos procesos que transforman un material sin forma (líquido, polvo o sólido) a una forma dada, por ejemplo la forja de matriz cerrada. Los procesos secundarios modifican, refinan o añaden características a un cuerpo ya formado, por ejemplo el mecanizado de acabado. Los procesos terciarios añaden calidad a la pieza, por ejemplo el proceso de pulido de superficies. En este caso, se ha realizado la selección dentro de los procesos primarios, Tabla 4-1.

Requerimientos de productos.

Para realizar la selección de procesos se han considerado los siguientes requerimientos de la biela de MCIA para los vehículos de automóvil, Tabla 4-1: la forma general de la biela, el tipo de material, el rango de masa, la tolerancia y el tamaño del lote.

- La forma general de la biela corresponde con un tipo de forma de 3D, considerando la clasificación de formas propuestas por (Esawi y Asbhy, 2000) (ver la Figura 2.16 del apartado 2.3.1.3).
- El tipo de material considerado ha sido el metálico, incluyendo así las aleaciones ferrosas y las no ferrosas.
- El rango de masa incluye el rango de valores entre los que puede oscilar una biela de MCIA de vehículos de automóvil; comprendido entre 0,3-0,9 kg. Esta información se ha extraído tras el análisis de bielas que proporcionan los fabricantes de las mismas (ARROW precision, 3w; Oliver Racing Parts, 3w)
- La tolerancia indica el rango de tolerancia que se requiere en la preforma de la biela. Este rango se ha obtenido de fabricantes de bielas (Oliver Racing Parts, 3w) y debe ser menor que 0,5 mm
- El tamaño del lote incluye el número estimado de bielas que se pretenden fabricar con un determinado proceso. En esta tesis se han realizado tres análisis. El primero

de ellos para un tamaño superior a 1.000 unidades, posteriormente para un tamaño superior a 10.000 y finalmente para más de 100.000 unidades (más correspondiente con lo habitual). De este modo se podrá ver la repercusión de este requerimiento sobre la selección de procesos.

Requerimientos considerados	Valores de los requerimientos
Características del proceso	Proceso de forma Proceso primario
Forma	3D
Material	Metal
Rango de masa	0.3-0.9 kg
Tolerancia	<0.5 mm
Tamaño del lote	>1.000 unidades >10.000 unidades >100.000 unidades

Tabla 4-1: Requerimientos considerados para la selección de procesos de fabricación de la biela MCIA de vehículos de automóvil.

El principio de funcionamiento de la herramienta de selección CES Selector consiste en interactuar o cruzar los diferentes requerimientos para hacer la discriminación de los procesos. Por ejemplo, cruzar el rango de masa con el tipo de material, o el rango de tolerancia con las características del proceso. Es necesario cruzar todos los requerimientos para hacer la selección. El resultado final, es decir el conjunto de procesos técnicamente viables para unos requerimientos dados, se obtiene de seleccionar sólo aquellos procesos que resultan viables para todos los cruces de requerimientos realizados

Considerando la información de la Tabla 4-1 se ha aplicado CES Selector a la biela de un MCIA. A continuación se muestran los resultados de los procesos viables para los diferentes cruces que se han realizado con los requerimientos considerados de la biela, así como también el resultado final de considerar todos los requerimientos de la misma.

En la Figura 4-10 se puede ver el resultado de los procesos primarios que son viables para el rango de masa establecido. Un total de 69 procesos de fabricación.

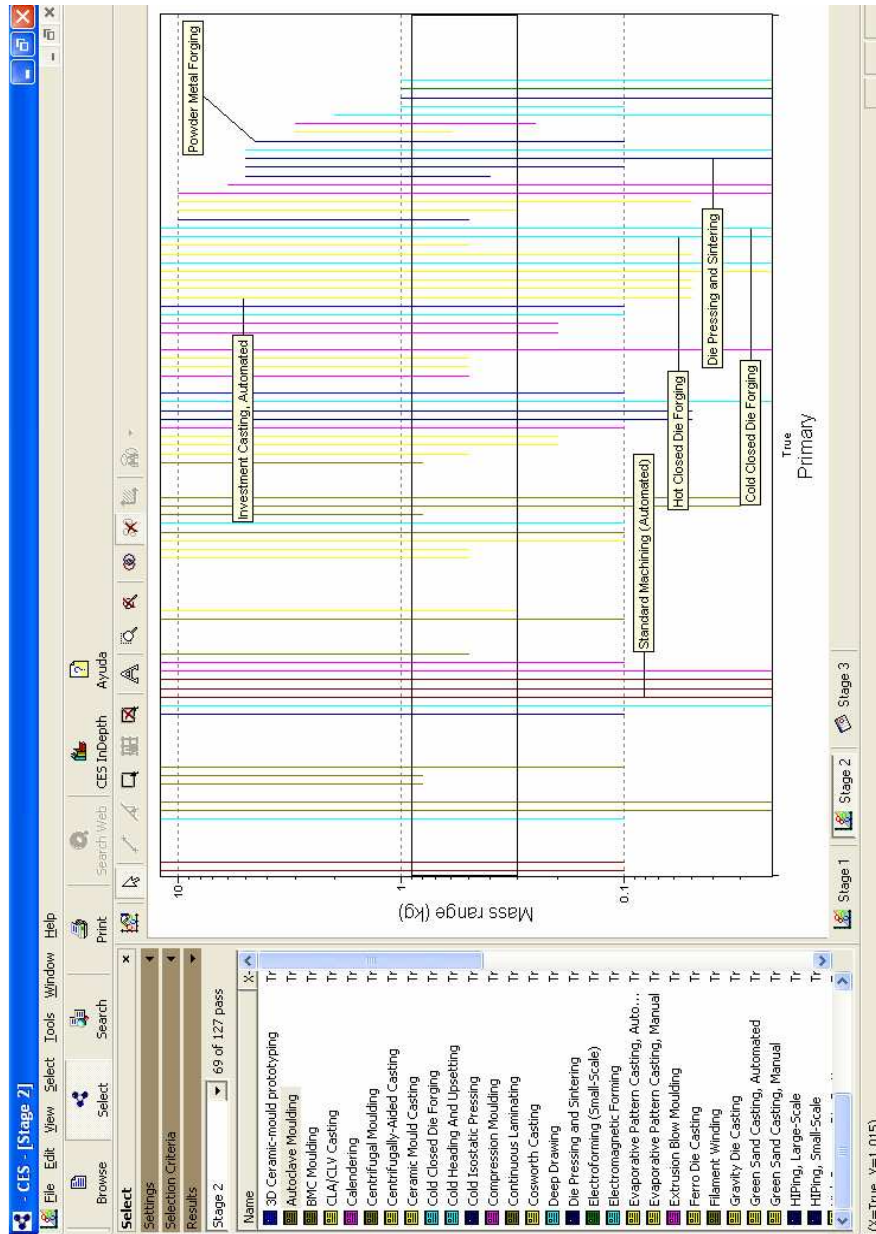


Figura 4-10: Gráfico del resultado de los procesos primarios que son viables para el rango de masa establecido en la biela.

En la Figura 4-11 se puede ver el resultado de los procesos primarios que son viables considerando el rango de tolerancia establecida y metal como tipo de material. Un total de 65 procesos de fabricación.

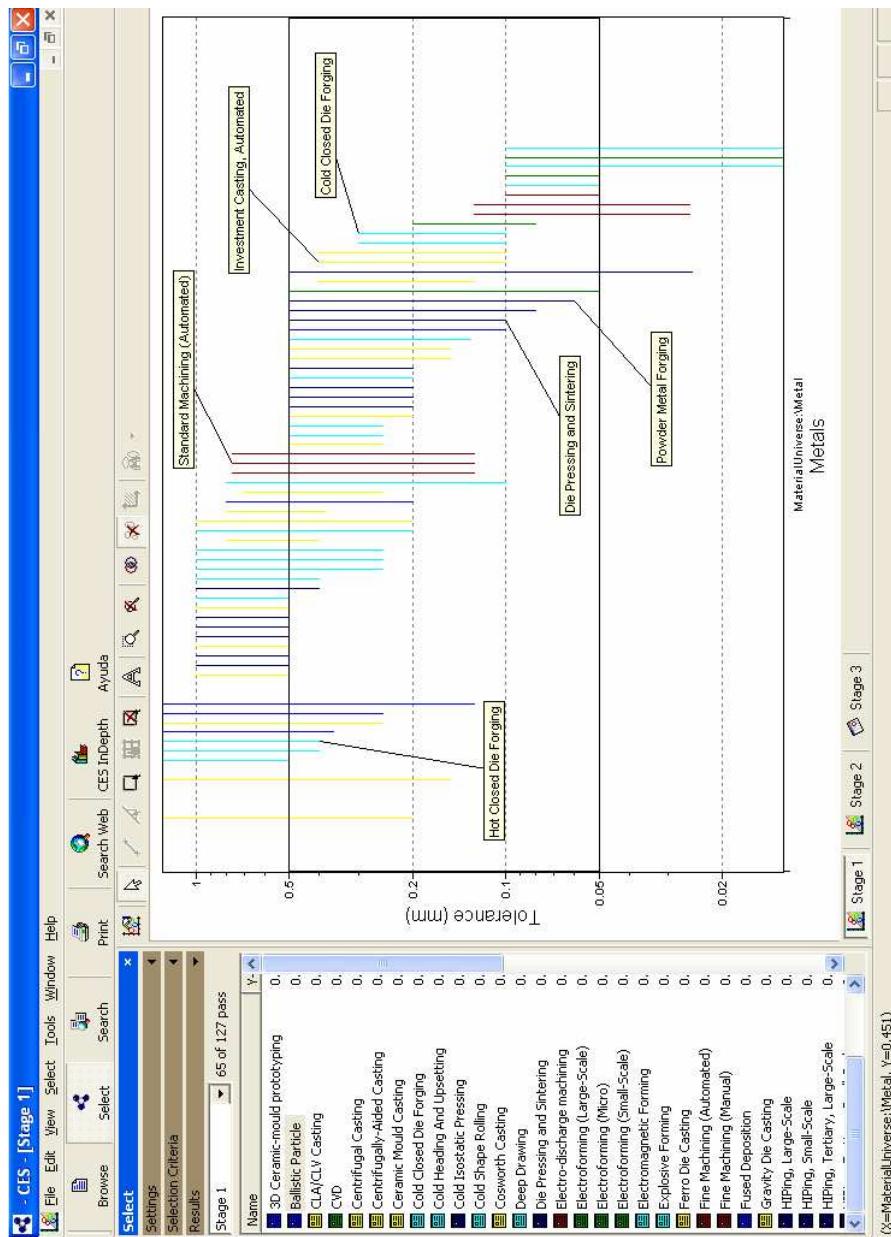


Figura 4-11: Gráfico del resultado de los procesos primarios que son viables considerando el rango de tolerancia establecido y el metal como tipo de material.

En la Figura 4-12 se puede ver el resultado de los procesos que son viables considerando la combinación de todas las restricciones de la biela, exceptuando el tamaño del lote. El resultado total es de 27 procesos de fabricación.

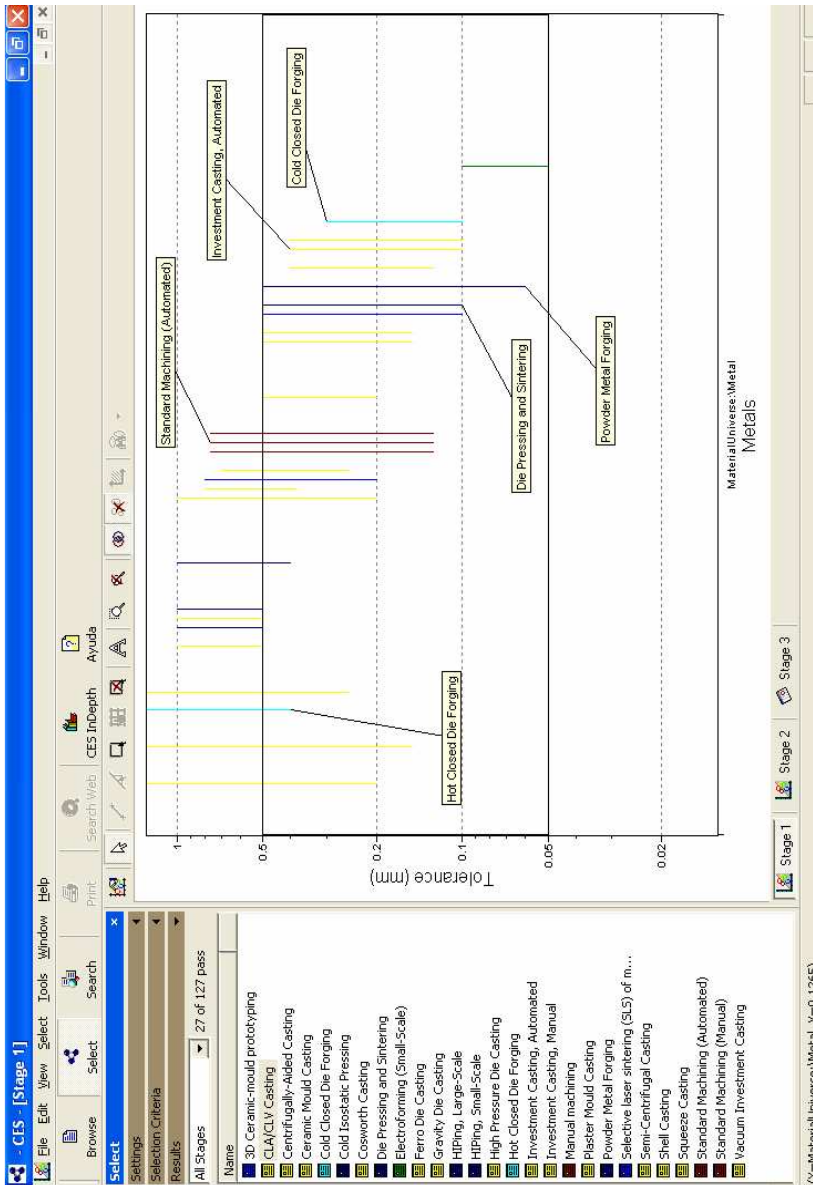


Figura 4-12: Gráfico del resultado de los procesos primarios que son viables considerando todos los requerimientos de la biela exceptuando el tamaño del lote.

La variación de la anterior lista de procesos considerando el tamaño de lote es la siguiente:

Tamaño de lote	Número de procesos técnicamente viables
No considerado	27
>1.000	21
>10.000	13
>100.000	11

Tabla 4-2: Lista de procesos técnicamente viables en función del tamaño del lote

Los resultados mostrados en la Tabla 4-2 reflejan la fuerte influencia del tamaño del lote en la selección de procesos de fabricación, como ya se ha comentado en el apartado 2.3.1.

En la Figura 4-13 se puede ver el resultado de los procesos son viables considerando la combinación de todas las restricciones de la biela y con un tamaño del lote superior a 100.000 unidades. Un total de 11 procesos de fabricación. Los cuales incluyen la tecnología de fundición, la forja, el polvo de metal y el mecanizado.

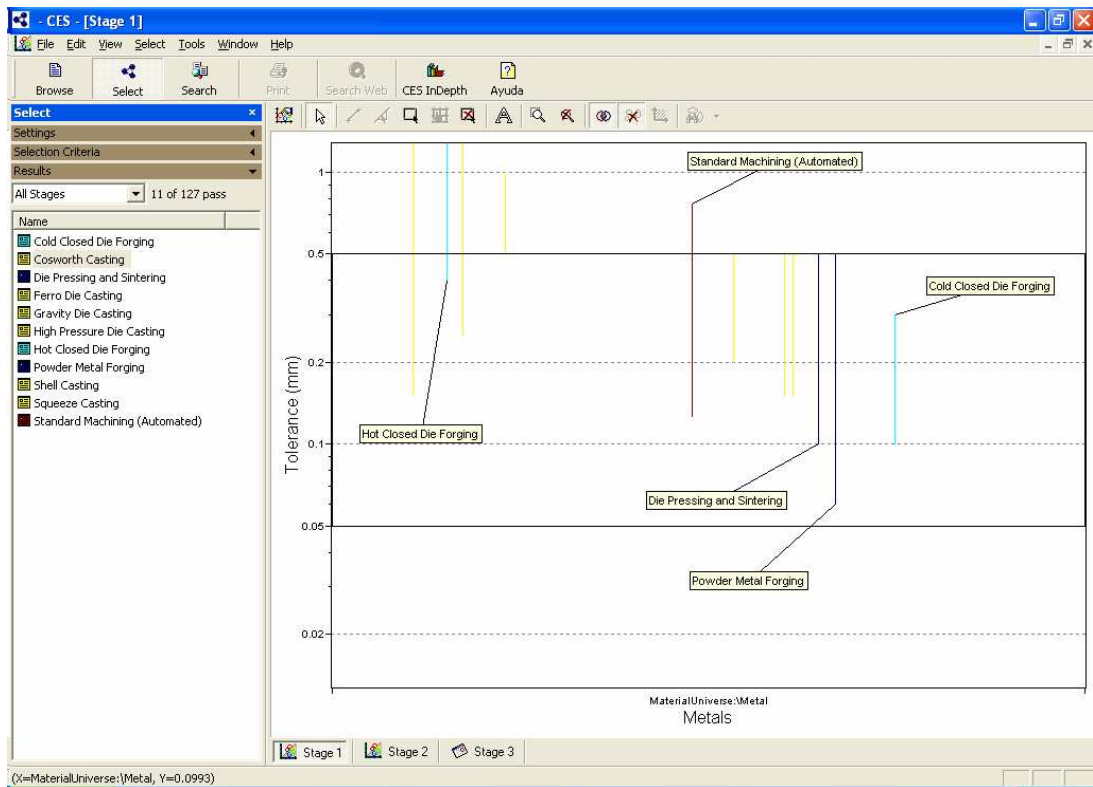


Figura 4-13: Gráfico del resultado de los procesos primarios que son viables considerando todas las restricciones de la biela y con un tamaño del lote superior a 100.000 unidades

La tecnología de fundición también se ha utilizado para fabricar este componente. Sin embargo dos principales razones han inducido que se dejara de utilizar (Shenoy, 2004). La primera de ellas, porque los poros que provocaba el proceso de fundición afectaba a la durabilidad y a la resistencia a la fatiga de este componente. La segunda, por el elevado coste asociado a las operaciones secundarias de mecanizado que se tenían que realizar hasta conseguir la pieza final.

Consecuentemente, la tecnológica de forja y de polvo de metal han ido predominando para fabricar este componente. Las ventajas principales son (Marra et al., 1992; Chernenkoff et al., 1995; Paek et al., 1997; Ilia et al., 2002): un buen comportamiento de las bielas fabricadas con estas tecnologías en la resistencia a la fatiga y la durabilidad, y una fabricación competitiva desde el punto de vista de costes, pues se reducen notablemente las operaciones secundarias de mecanizado.

Considerando los resultados proporcionados por CES Selector, junto con los procesos que se utilizan habitualmente para fabricar este componente, la metodología se ha aplicado los procesos de forjado en caliente con matriz cerrada (*hot closed die forging*), compactado y sinterizado de polvo de metal (*die pressing and sintering*) y la forja de polvo de metal (*powder metal forging*). El hecho de considerar también el compactado y sinterizado de polvo de metal radica en que según los resultados de CES, también es un proceso técnicamente viable para la fabricación de la biela, y además porque es el proceso base para conformar la preforma de la forja del polvo de metal.

a. Forjado con matriz cerrada

El forjado con matriz cerrada (*Hot die forging, H/F*) es un proceso de deformación en caliente. En este tipo de forjado la pieza adquiere la forma de las cavidades del dado, al forjarse entre dos matrices perfiladas o que tienen la forma inversa de la geometría esperada (Kalpakjian y Schmid, 2001). Los pasos del forjado de la biela se ilustran en la Figura 4-14.

La longitud del bruto de partida, generalmente barra redonda o cuadrada, debe proporcionar el volumen de metal necesario para llenar completamente las cavidades de la matriz y para generar la rebaba de la pieza. La rebaba tiene dos funciones. En primer lugar la rebaba es la válvula de alivio del material por la extrema presión del cerramiento de las matrices. En segundo lugar frena la salida hacia el exterior del material, garantizando un llenado completo de la matriz para conseguir la configuración del diseño final (Committee under ASM direction, 1988)

En el proceso de forjado el material tiene que fluir para conseguir el llenado de la matriz que configurará la forma final a la pieza. Así pues, la habilidad del material a fluir, la fricción y el efecto de enfriamiento en la interfase pieza-matriz, y la complejidad de la forma de la pieza son parámetros claves para este proceso de fabricación (Committee under ASM direction, 1988).

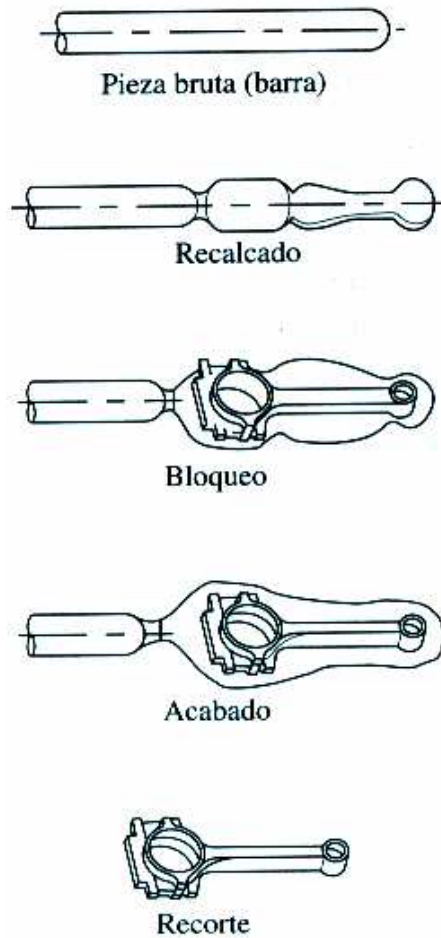


Figura 4-14: Etapas en el proceso de forjado de la biela (fuente de: (Kalpakjian y Schmid, 2001))

La biela objeto de este trabajo también puede ser forjada con el proceso de forjado de precisión (Vazquez y Altan, 2000; Forging Industry Association, 3w). Este tipo de forjado se incluye dentro de los procesos de forma casi neta o de forma neta, en los que la pieza obtenida tiene las dimensiones finales más próximas a las dimensiones de la pieza final. La ventajas de este proceso radican en la disminución de las operaciones secundarias de mecanizado para obtener las dimensiones finales, en un mejor aprovechamiento de material por la ausencia de rebabas y en buenos acabados superficiales. En cambio, el coste del proceso aumenta notablemente. Los motivos principales son: la necesidad de equipos que pueden aplicar mayores fuerzas para obtener la precisión dimensional esperada, matrices especiales y más complejas, un control preciso del volumen de material y una gran precisión en el cerramiento de las matrices del forjado

b. Compactación y sinterizado de polvo de metal

El proceso convencional de compactación y sinterizado de conformado en molde de polvo de metal (*Powder Metall, P/M*) es un proceso de fabricación que combina la obtención de una forma, mediante la compactación del polvo, con la definición de las propiedades del material y del diseño final del producto, mediante sinterización (Committee under ASM direction, 1997). Este proceso de fabricación se considera un proceso de forma neta o forma casi neta (*near-net or net-shape*), pues no genera desperdicios de material y proporciona altas tolerancia que conducen a que las dimensiones finales de la pieza sean muy cercanas o iguales a la pieza final.

El material de partida de este proceso son los polvos metálicos, los cuales deben producirse y posteriormente mezclarse para poder iniciar el proceso de conformado. La elección de los polvos depende de los requerimientos del producto final (Kalpakjian y Schmid, 2001); pues la forma, la distribución de tamaño, la porosidad, la pureza química y las características de la superficie de las partículas pueden influenciar para conseguirlos.

La mezcla permite combinar diferentes materiales, metálicos o no, diferentes formas y tamaños de polvo para conseguir propiedades físicas y mecánicas específicas para los productos. También permite mezclar lubricantes para mejorar el flujo de los polvos cuando se conforman.

Cuando la mezcla esta preparada, los polvos mezclados son compactados dentro de unas matrices. El objetivo de la compactación es conseguir la forma, la densidad, el contacto requeridos entre partículas y hacer la pieza suficientemente fuerte para ser procesada posteriormente. El polvo debe fluir con facilidad para garantizar el completo llenado de la matriz.

Posteriormente, la pieza compactada se calienta en un horno de atmósfera controlada a una temperatura por debajo de su punto de fusión, pero suficientemente alta permitir la unión de las partículas individuales. Esta etapa se conoce como sinterizado y proporciona la densidad final a la pieza. Esta densidad final depende principalmente de la densidad de la pieza compactada y de las condiciones de la sinterización. Estas condiciones están relacionadas con la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. Para las piezas estructurales de P/M, una densidad final alta es muy deseable, pues proporciona mejores características mecánicas en las mismas. Además en la producción convencional de las piezas de P/M, es preferible reducir al mínimo el aumento en densidad durante la sinterización, con la finalidad de obtener una buena precisión dimensional y tolerancias. Las temperaturas de la sinterización están generalmente dentro del 70% y del 90% del punto de fusión del metal o de la aleación. Los tiempos de la sinterización varían dependiendo del material.

c. Forjado de metalurgia de polvos

La forja de metalurgia de polvos (*Powder forging, P/F*) es un proceso en el cual una preforma de metal no sinterizada, presintetizada o sinterizada es forjada en caliente dentro de unas

matrices que le confieren la forma al diseño final. El proceso se denomina normalmente P/M forjado en caliente o simplemente P/F (Committee under ASM direction, 1998).

El forjado de metalurgia de polvos puede considerarse como una operación secundaria o una extensión del proceso de compactación y sinterizado de pulvimetalurgia convencional (Kalpakjian y Schmid, 2001). Porque partiendo de una preforma de polvos metálicos y no metálicos, con normalmente el 80-85% de la densidad teórica, se puede obtener productos con una densidad final del 99% de la densidad teórica del material (Committee under ASM direction, 1998).

En el caso de la biela los pasos que se siguen para conformar el producto son: la mezcla de los polvos, la compactación de la mezcla, presintetizado y finalmente el forjado. Normalmente la preforma de P/M se transporta desde el horno de sinterizado hasta la prensa donde están ubicadas las matrices para hacer forjado en caliente. La pieza es conformada mediante un sólo golpe, con las marices completamente cerradas y no se generan rebabas. Contrariamente al forjado con matriz cerrada, en el que se precisa de varios golpes y se genera rebaba.

Este proceso permite obtener buenas tolerancias y acabados superficiales, además de un buen aprovechamiento del material. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas finales, pueden ser equivalentes a las obtenidas con un proceso de forja convencional (Paek et al., 1997). Aunque es importante destacar algunos aspectos que son importantes para conseguir las propiedades deseadas. En primer lugar, la composición química, el tipo y el tamaño de las partículas de polvo de material afectan en las propiedades mecánicas y en el acabado superficial. En segundo lugar, la distribución del peso en la preforma es clave para conseguir una completa densidad. Así como también la forma de la preforma es importante para conseguir la forma de la pieza final.

Desde el punto de vista del coste de procesado, el conjunto de operaciones y herramientas para obtener la forma del componente son un poco más elevados que en la forja de matriz cerrada, aunque las operaciones secundarias de mecanizado se reducen notablemente con este proceso.

4.3. Aplicación de la metodología: la biela

En esta sección se van a exponer los resultados obtenidos de aplicar la metodología propuesta en el Capítulo 3 al diseño de la biela y a los procesos de fabricación descritos en el apartado anterior: la forja con matriz cerrada, el proceso de compactación y sinterizado de polvo de metal y la forja de polvo de metal.

En primer lugar, se plantea una breve reflexión sobre las ventajas e inconvenientes que han conllevado aplicar la metodología a un diseño real y las consecuencias que esto ha generado en la presentación de los resultados.

En segundo lugar, se expone la información de partida necesaria para aplicar la metodología

En tercer lugar, se presentan los resultados de la metodología en cada dominio

Y finalmente, se muestra un ejemplo de la aplicación de los resultados obtenidos y se compara la aproximación propuesta en este trabajo con la aproximación propuesta por CES Selector.

4.3.1. Consideraciones previas

La metodología ha sido aplicada al diseño de una pieza real. Por ello es interesante antes de empezar a exponer su aplicación las ventajas y los inconvenientes que esto ha conllevado.

- La información disponible facilita la definición y formalización de la información de los dominios.

El hecho de utilizar una pieza real permite disponer de bastante información real sobre el componente. Esto facilita, en cierto modo, que la definición de la información de cada dominio se pueda realizar de forma más focalizada y directa. Porque en un diseño completamente nuevo, la definición de la información de cada uno de los dominios está mucho más sujeta a la iteración, retroalimentación y modificación a lo largo de las fases de diseño.

No obstante, a pesar de disponer de la información, se requiere de un análisis profundo de la misma. Porque, como ya se ha comentado a lo largo de esta tesis, en los procedimientos de diseño reales es habitual trabajar con bastante información en forma implícita.

- La información que se genera de aplicar la metodología es demasiado amplia para presentar todos los resultados.

En la mayoría de diseños reales, aun y no siendo tan complejos como la biela, la cantidad de información que se genera y que debe gestionarse es realmente amplia. Aunque en muchas ocasiones no se sea consciente de ello.

En un sentido figurado, la generación de la información de diseño se podría comparar con la evolución de las ramas de un árbol. En el que una rama principal se diversifica en muchas ramas, de las cuales, cada una de ellas se vuelve a ramificar. En este caso sucede lo mismo. Para cumplir con un requerimiento funcional (FR) se requiere definir un número “n” de parámetros de diseño (DPs), y cada uno ellos pueden estar afectados por un número “m” de propiedades de proceso (PPs) para, como mínimo, un proceso de fabricación.

Consecuentemente, no se expone en esta tesis toda la información que se derivaría de aplicar la metodología propuesta a la biela en cada uno de los dominios. Inicialmente se plantea toda la información que se debería definir dentro de cada uno de ellos, posteriormente se acota dicha información y finalmente se detalla la parte que ha sido acotada.

- Los resultados de aplicar la metodología incluyen de definición y formalización de información real y conocimiento, de diseño y de procesos de fabricación, que puede ser utilizada para otros diseños.

Realmente la biela es un componente que ha sido estudiado de forma profunda tanto en el proceso de diseño como en el proceso de fabricación. Por lo tanto, en ese sentido, quizás la utilización de los resultados puede resultar no demasiado provechosa. Sin embargo, estos resultados son una buena base de conocimiento para desarrollar un sistema basado en información real que puede ser utilizado en el diseño de otros componentes que no sean la biela.

- La aplicación de la metodología a un diseño real proporciona mejor idea de la implicación que puede llevar aplicar esta metodología en la realidad. Realmente se puede comprobar como de buena o como de aplicable sería esta metodología en la realidad. En resumen, se está más cerca de la realidad.

4.3.2. Funciones y restricciones de la biela

La biela tiene que cumplir con tres funciones principales:

1. Conectar el pistón y el cigüeñal
2. Transmitir la fuerza del pistón al cigüeñal
3. Transferir el empuje del cigüeñal al pistón.

Como se ha comentado en el apartado 4.1, la biela es uno de los elementos que también colabora en llevar a cabo la función de convertir el movimiento de translación en rotación y viceversa. Esta función se realiza mediante el conjunto biela-cigüeñal, y por ello, en el diseño de la biela se tendrá que tener en cuenta las restricciones que comportan cumplir con esta función del sistema. Como se observa en la Figura 4-15, estas restricciones se introducen como restricciones asociadas a la función conectar el pistón al cigüeñal.

Considerando el principio de diseño de (Ullman, 1992; Pahl et al., 1996; Otto y Wood, 2001), en el que las funciones principales se tienen que descomponer para poder buscar las soluciones de diseño, es necesario descomponer las funciones principales de la biela en sus correspondientes subfunciones, Figura 4-15 .

- Para conectar el pistón y el cigüeñal, las subfunciones que tiene que llevar a cabo la biela son:
 - La biela tiene que conectarse con el pistón
 - La biela tiene que conectarse con el cigüeñal.
- Para transmitir la fuerza del pistón al cigüeñal, las subfunciones que tiene que llevar a cabo la biela son:
 - La biela tiene que recibir (importar) la fuerza del pistón
 - La biela tiene transmitir (guiar) la fuerza generada en la biela
 - La biela tiene proporcionar (exportar) la fuerza generada en la biela al cigüeñal

Se asume que para cualquiera de estas subfunciones, la biela tiene que resistir las fuerzas. De lo contrario las funciones no serían cumplidas correctamente. El hecho

de que no se considere el verbo “resistir” como una función radica en que no es considerado en la taxonomía de funciones propuesta por Pahl (Pahl et al., 1996) y Otto (Otto y Wood, 2001)

- Para transmitir el empuje del cigüeñal al pistón, las subfunciones que tiene que llevar a cabo la biela son:
 - La biela tiene que recibir (importar) el empuje del cigüeñal
 - La biela tiene transmitir (guiar) la fuerza generada en la biela
 - La biela tiene proporcionar (exportar) la fuerza generada en la biela al pistón

Este conjunto de funciones y subfunciones se refleja en la Figura 4-15.

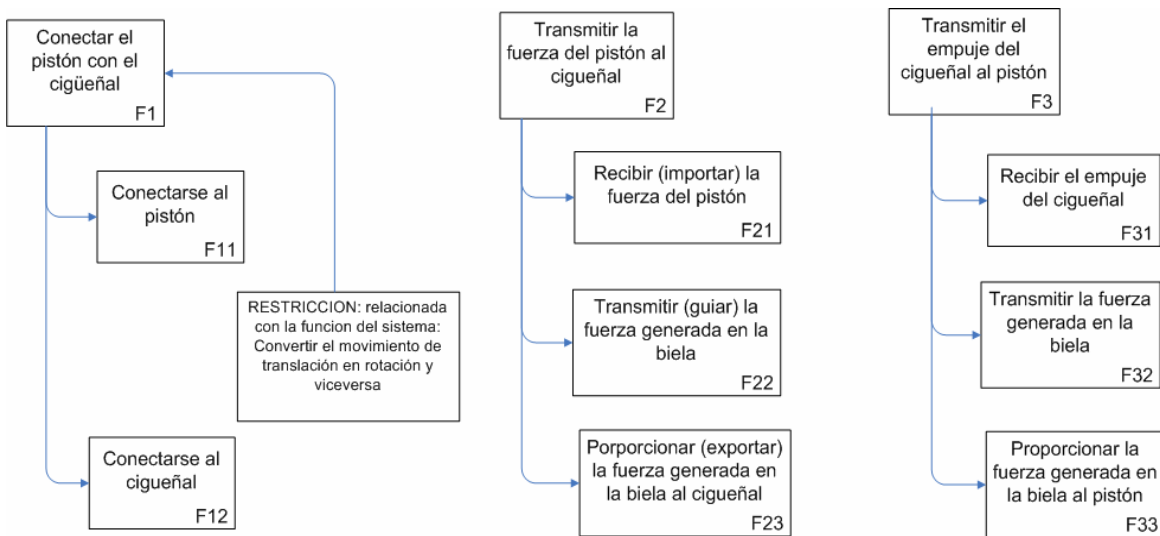


Figura 4-15: Jerarquía funcional de la biela de un MC IA

Además de las funciones y las subfunciones, la biela tiene un conjunto de restricciones asociadas que también tienen que ser consideradas antes de iniciar al aplicación de la metodología. Algunas de las restricciones derivan del conjunto del motor al cual pertenece la biela, y otras son específicas de la misma.

Durante mucho tiempo, las demandas para incrementar la potencia, la calidad, disminuir el peso, el consumo de combustible y el coste en los vehículos de automóvil han aumentando (Paek et al., 1997). Con lo cual, la biela se ha visto también afectada en algunas de sus propiedades:

- El peso reducido de la biela disminuye la masa en movimiento que afecta a las vibraciones del motor (Chernenkoff et al., 1995; Paek et al., 1997). Además, las bielas ligeras permiten diseñar cigüeñales más ligeros que también intervienen en las vibraciones del motor (Paek et al., 1997). En general, un peso ligero mejora las

propiedades ruido, vibración y dureza (*Noise, Vibration and Hardeness, NVH*) del motor (Chernenkoff et al., 1995; Paek et al., 1997; Froes et al., 2004).

El peso ligero de la biela también incide en la mejora del comportamiento del motor favoreciendo la reducción del consumo de combustible (Chernenkoff et al., 1995; Paek et al., 1997; Froes et al., 2004).

- El coste de la biela tiene que contribuir a la disminución de coste del motor. Lo cual afecta al material y al proceso de fabricación de dicho componente. Citando a (Chernenkoff et al., 1995): “la biela tiene que tener la máxima resistencia con la mínima masa y al mínimo coste”
- La variación de la masa que puede tener la biela después de ser procesada puede afectar a las vibraciones del motor. Pues los contrapesos están calculados y equilibrados bajo unas consideraciones dadas, y mucha variación de masa afecta en la respuesta del motor (Chernenkoff et al., 1995).
- La tolerancia de la longitud entre los centros de unión del pistón y del cigüeñal es una de las características más importantes del diseño de la biela (Howarth, 1966). Según (Howarth, 1966), se considera razonable una tolerancia del 0,03% de la longitud. Aunque analizando diferentes fabricantes de este componente se define que la biela tiene que conectar el pistón con el cigüeñal con una precisión final en la conexión de +/- 0.1mm (ARROW precision, 3w; Corus, 3w; Oliver Racing Parts, 3w)
- La biela es un elemento del sistema mecánico del motor que tiene que ser desmontable de los dos componentes que une, el pistón y el cigüeñal.
- La biela debe superar los 10e6 ciclos de funcionamiento.
- La geometría y dimensiones de los elementos colindantes tienen que ser consideradas en el diseño de la biela. Así como también el volumen de espacio disponible en el pistón y en el cigüeñal.
- Para el correcto funcionamiento del sistema mecánico del motor, los elementos tienen que estar lubricados y el sistema refrigerado para evitar su gripado o agarrotamiento.

La formalización de estas restricciones se expone en la Tabla 4-3. Los valores de la tabla son aproximaciones representativas para la biela de MCIA para vehículos de automóvil. Cuando el valor está representado por el símbolo *, significa que no se disponen de valores para dicha restricciones; aunque deberían añadirse para el diseño de este componente.

Restricción	Valor	Unidades	Tolerancia
Masa de la biela	[0.55-0.65]	kg	*
Coste de la biela	[150-200]	€	*
Longitud de unión de los elementos	140	mm	+/- 0.1
Ciclo de vida	>10e6	ciclos	*
Espacio disponible en el pistón			
Dirección X	*	mm	*
Dirección Y	*	mm	*
Dirección Z	*	mm	*
Volumen disponible en el cigüeñal			
Dirección X	*	mm	*
Dirección Y	*	mm	*
Dirección Z	*	mm	*
Lubricación de la biela	Tipo de lubricante	--	--

Tabla 4-3: Formalización de las restricciones de diseño del componente biela

Considerando las funciones de la biela, las subfunciones de la misma y sus restricciones asociadas, ya se puede iniciar la aplicación de la metodología propuesta en esta tesis.

4.3.3. Resultados de la aplicación de la metodología a la biela

Los resultados de la aplicación de la metodología se han presentado siguiendo la misma de la metodología expuesta en la Figura 3-2 del apartado 3.4. Inicialmente se presentan los resultados correspondientes con la Fase I y posteriormente los de la Fase II.

4.3.3.1. Fase I: Definición de la información de diseño

Dominio funcional

Etapa I: Definir y formalizar los requerimientos funcionales (FRs)

Los requerimientos funcionales (FRs) se tienen que definir para cada una de las funciones y subfunciones de la jerarquía funcional mostrada en la anterior Figura 4-15. En primer lugar hay que definir los FRs que corresponden a las funciones de primer nivel de dicha jerarquía, y posteriormente los correspondientes al segundo nivel.

Considerando la relación entre los requerimientos funcionales de diferentes jerarquías propuesta por (Suh, 2001), las restricciones de los requerimientos de primer nivel se heredan hacia los niveles posteriores; en este caso, el segundo nivel.

No obstante, hay que puntualizar que en este trabajo se han desarrollado los requerimientos funcionales que corresponden a las dos primeras funciones, F1 y F2 (Figura 4-15), y a sus correspondientes subfunciones. Las razones que justifican esta decisión son las siguientes:

- Según Giacosa (Giacosa, 1988), cuando se analiza la biela de un motor monocilíndrico se puede considerar que la fuerza resultante del pistón, en las diferentes fases del ciclo del motor, es la fuerza que se transmite sobre el sistema biela-cigüeñal para generar el par motor (Ver apartado 4.2.2). Por consiguiente, se asume que no es un error tan grande el hecho de no considerar el empuje del cigüeñal al pistón (F3 de la Figura 4-15) en el diseño preliminar de este componente.
- La biela es un elemento de diseño bastante complejo (Shenoy, 2004), de modo que simplificar el caso ha ayudado a exponer mejor la aplicación de la metodología.
- El uso de estas funciones ha proporcionado suficiente información para demostrar la aplicación de la metodología. Pues como ya se ha comentado en el apartado 4.3.1 un único requerimiento funcional lleva asociado una amplia cantidad de información en los demás dominios de diseño, en el dominio físico y en el dominio de proceso.

La definición de los requerimientos funcionales (FRs) se ha realizado según la estructura de un requerimiento funcional (FR) expuesta en la etapa I del Capítulo 3. Por lo tanto se ha determinado la función y los calificadores de cada uno de ellos. La formalización de los FRs se ha basado en la matriz de formalización y representación, también expuesta en esa misma sección, para representar toda la información asociada a cada uno de ellos.

a. Definición de los requerimientos funcionales (FRs) de primer nivel.

La definición de los requerimientos funcionales de primer nivel (FR1 y FR2) se corresponde con las funciones F1 y F2, respectivamente, de la jerarquía funcional de la Figura 4-15.

Definición del primer requerimiento funcional (FR1)

Este requerimiento se ha definido para la función “conectar el pistón con el cigüeñal” (F1 de la Figura 4-15). La acción corresponde al verbo en activo: conectar. El objeto corresponde con el flujo de material: sólidos (el pistón y el cigüeñal)

Los calificadores asociados a esta función se definen con las restricciones de la Tabla 4-4.

Tipo de restricciones	Descripción de la restricción
Entrada	Número de elementos a unir
	Ubicación espacial de los elementos a unir.
	Dinámica de los elementos a unir
Salida	Dinámica relativa entre las uniones de los elementos
	Desgaste
Entorno	Temperatura
	Agentes químicos

Tabla 4-4: Restricciones de función asociadas a FR1

Las restricciones de entrada que limitan esta función son: el número de elementos a unir, su correspondiente ubicación espacial y su dinámica asociada.

- Número de elementos a unir

La biela tienen que unir tres elementos principales: el pistón, el cigüeñal y la propia biela. Por lo tanto el número de elementos a unir se representa con un número.

- Ubicación espacial de los elementos a unir.

Los elementos a unir están en un mismo plano X-Y, de modo que la distancia de unión entre ellos en dirección Z es de 0 mm (Figura 4-16). La distancia de unión en dirección X-Y corresponde con la longitud (L) entre centros de la biela (Figura 4-16). Esta distancia se define mediante un valor numérico, las unidades y la tolerancia.

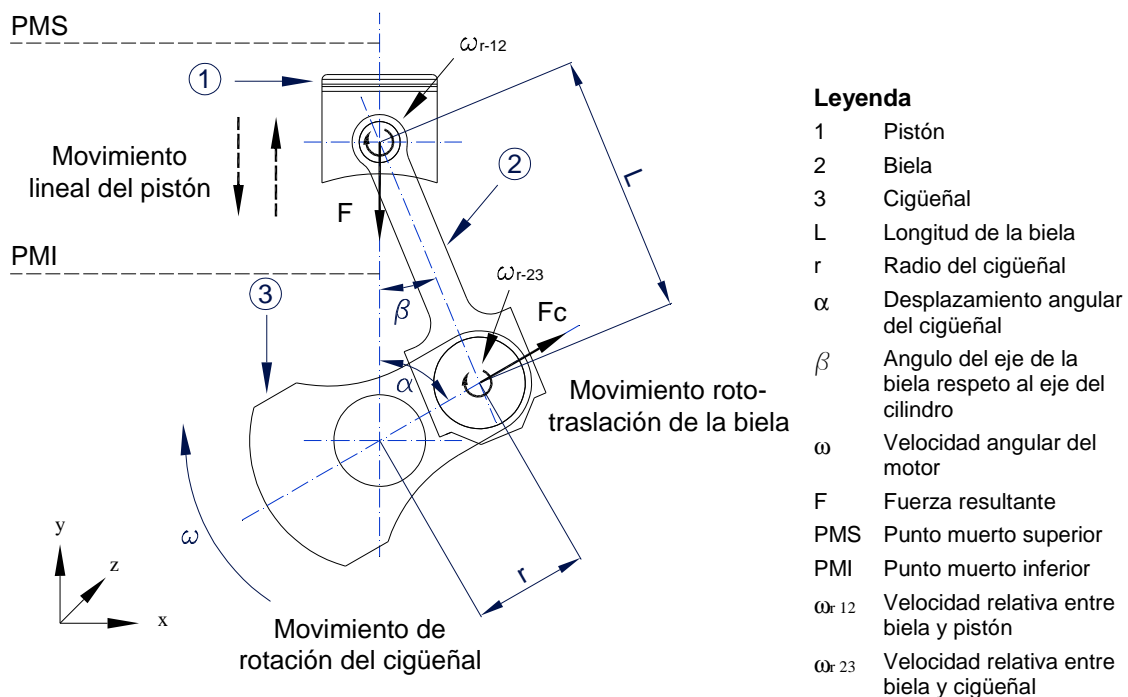


Figura 4-16: Esquema de los movimientos de la biela y de los elementos unidos a la misma

- Dinámica de los elementos a unir.

La biela tiene que unir dos elementos que son dinámicos. Es decir el pistón y el cigüeñal están en movimiento; no son estáticos.

- El pistón tiene un movimiento alternativo de translación, Figura 4-16. La trayectoria es paralela a las paredes del cilindro del motor y se desplaza desde el PMS al PMI, conocido como la carrera del pistón. Por el propio

funcionamiento del sistema biela-cigüeñal esta carrera corresponde con dos veces el radio del codo del cigüeñal. La velocidad lineal (V) se determina en función de: la velocidad de rotación del motor (ω), el radio del codo del cigüeñal (r), el ángulo girado del mismo (α) y la relación entre la longitud de la biela y en radio del codo del cigüeñal (λ)

$$V = \omega * r * (\text{sen}\alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen}\alpha) \quad (4-3)$$

- El cigüeñal tiene un movimiento de rotación y gira de forma cíclica alrededor de su propio eje, en el sentido establecido por el motor, Figura 4-16. La velocidad de rotación está establecida por el régimen de giro del motor.

Para definir la dinámica de cada uno de estos elementos se ha utilizado la siguiente información: la trayectoria del movimiento, su dirección, el valor de la velocidad y la distancia a recorrer.

- La trayectoria se define especificando todos los desplazamientos y los movimientos, tanto en dirección lineal como angular, en las tres direcciones del espacio (X, Y, Z).
- La dirección se define especificando el sentido de estos desplazamientos y movimientos respecto a un eje de coordenadas fijo.
- Los valores de los desplazamientos (espacio recorrido) y de los movimientos (valor de la velocidad) se expresan mediante valores numéricos.

Las restricciones de salida que limitan esta función son: la dinámica relativa de las uniones de los elementos y el desgaste de los elementos unidos.

- Dinámica relativa entre las uniones de los elementos

Cuando la unión ha sido realizada y el conjunto está en funcionamiento se deben permitir movimientos relativos entre los elementos. El movimiento relativo entre el pistón y la biela debe ser de rotación, lo cual significa que debe permitir el movimiento de rotación respecto a la dirección del eje Z, Figura 4-16. Del mismo modo que el movimiento relativo entre la biela y el cigüeñal que también debe ser de rotación respecto a la dirección del eje Z, Figura 4-16. Estos movimientos de rotación se definen mediante la velocidad de rotación relativa respecto al eje Z y el desplazamiento angular en el plano X-Y

- Desgaste

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas que están en movimiento relativo (Shigley y Mischke, 1998). En este componente el desgaste se puede representar mediante la vida útil que debe soportar la biela antes de su fallada, el cual se puede definir mediante el número de ciclos.

La restricción del entorno que limita esta función incluyen la temperatura en la que se lleva a cabo la función y los agentes químicos agresivos presentes en el ambiente (Sala, 2002)

- La temperatura que se transmite al ambiente, como consecuencia del proceso de combustión, genera que esta función deba llevarse a cabo en un ambiente de temperatura elevada, que puede oscilar entre los 80-90 °C . Esta restricción se define mediante el rango de valores numéricos que puede oscilar la temperatura alrededor de la biela, las unidades de dichos valores y la tolerancia.
- Los agentes químicos agresivos presentes en el sistema motor, como el fuel y los lubricantes, pueden afectar en el cumplimiento de las funciones del motor (Sala, 2002). Esta restricción puede definirse identificando la composición química de los agentes químicos presentes en el ambiente.

Tras haber identificado las restricciones asociadas a la función del primer requerimiento funcional (FR1), es necesario identificar las restricciones de diseño que pueden afectar a dicho requerimiento. Considerando el conjunto de restricciones formalizadas en la Tabla 4-3 de la sección 4.3.2, las restricciones de diseño que afectan a este requerimiento funcional (FR1) son: la masa y el coste de la biela, el sistema tiene que ser desmontable y el volumen de espacio disponible en el pistón y el cigüeñal.

Considerando este conjunto de información asociada a este requerimiento funcional, la matriz de formalización para el primer requerimiento funcional (FR1) se expone en la Tabla 4-5. Los valores de la tabla son aproximaciones representativas para la biela de MCIA para vehículos de automóvil. Cuando el valor está representado por el símbolo *, significa que no se disponen de valores para dicha restricciones; aunque deberían añadirse para el diseño de este componente.

FORMALIZACION DE UN FRs				
Nivel predecesor de FRs		--		
Código requerimiento		FR1		
Descripción requerimiento		Unir el pistón y el cigüeñal		
FUNCION				
	Acción (verbo)	Objeto (Flujo)		
Función	Unir	Material (el pistón y el cigüeñal)		
Tipo de Restricción	Descripción de la restricción (Cs)	Valor	Unidades	Tolerancia
Entrada	Número elementos a unir	3	elementos	--
	Ubicación espacial de los elementos a unir.			
	- Distancia de los elementos a unir en dirección Z	0	mm	+/-
	- Distancia de los elementos a unir en dirección X-Y	140	mm	+/- 0.1
	Dinámica del pistón			
	- Trayectoria	Lineal respecto eje Y		
	- Desplazamiento y velocidad angular en cualquier dirección	0	--	--
	- Desplazamiento y velocidad lineal en dirección X y Z	0	--	--
	- Desplazamiento en dirección Y (δy), que corresponde con la carrera del pistón	*	mm	*
	- Velocidad en dirección Y (V_y)	*	m/s	*
- Dirección del desplazamiento y movimiento	+/- respecto al eje Y			
Dinámica del cigüeñal				
- Trayectoria	Rotacional respecto al eje Z			
- Desplazamiento y velocidad lineal en cualquier dirección.	0	--	--	
- Desplazamiento angular en el plano Z -X y Z-Y	0	--	--	
- Velocidad de rotación respecto al eje X e Y	0	--	--	
- Desplazamiento angular en el plano X -Y	(0-360)	°	*	
- Velocidad angular respecto eje Z (ω_z)	*	rad/s	*	
- Dirección del desplazamiento y movimiento	Rotación unidireccional			

Tabla 4-5: Matriz de formalización del FR1 de la biela

<i>Tipo de Restricción</i>	<i>Descripción de la restricción (Cs)</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Tolerancia</i>
Salida	Dinámica relativa del pistón-biela - Desplazamiento angular relativo en el plano X-Y (ϕ_{x-y}) - Velocidad angular relativa respecto eje Z (ω_z)	Rotación * *	° rad/s	* *
	Dinámica relativa de la biela-cigüeñal - Desplazamiento angular relativo en el plano X-Y (ϕ_{x-y}) - Velocidad angular relativa respecto eje Z (ω_z)	Rotación * *	° rad/s	* *
	Desgaste	>10e6	ciclos	
Entorno	Temperatura	[80-90]	°C	+/- 10
	Agente químico	Composición química		
Diseño	Tiene que ser desmontable de los dos componentes que une	--	--	--
	Restricciones de espacio alrededor del pistón - Dirección X - Dirección Y - Dirección Z	* * *	mm mm mm	* * *
	Restricciones de espacio alrededor del cigüeñal - Dirección X - Dirección Y - Dirección Z	* * *	mm mm mm	* * *
	Masa de la biela	[0.5-0.7]	kg	*
	Coste de la biela	[150-200]	€	*

Tabla 4-5: Continuación

Definición del segundo requerimiento funcional (FR2)

Este requerimiento se ha definido para la función de “transmitir la fuerza del pistón al cigüeñal” (F2 de la Figura 4-15). La acción corresponde al verbo en activo: transmitir. El objeto corresponde con el flujo de energía: fuerza

Los calificadores asociados con esta función se definen con las restricciones de la Tabla 4-6.

Tipo de restricciones	Descripción de la restricción
Entrada	Fuerza del pistón
Salida	Fuerza cigüeñal
	Rendimiento
	Durabilidad
Entorno	Temperatura
	Agentes químicos

Tabla 4-6: Restricciones de función asociadas a FR2

La restricción de entrada que limita esta función es la fuerza del pistón.

- La fuerza del pistón (F) es la fuerza resultante que se genera como consecuencia de la presión ejercida por el fluido (líquido y gas) y de la fuerza de inercia generadas por las masas en movimiento. Esta fuerza (F) se considera paralela a la dirección del cilindro, Figura 4-17, y como ya se ha expuesto en el apartado 4.2.2, cambia de valor y de sentido en función de la posición de la manivela, del ciclo de combustión y del régimen de giro del motor. Por lo tanto, asumiendo que la fuerza del pistón es variable, para definirla se precisa de concretar: la dirección, el sentido y el rango de valores de dicha fuerza.

Las restricciones de salida que limitan esta función son: la fuerza del cigüeñal, el rendimiento de las fuerzas transmitidas y la durabilidad de la biela.

- La fuerza del cigüeñal (Ft) se genera como consecuencia de la fuerza que recibe el cigüeñal de la biela (Fb) y de la fuerza centrífuga (Fc) originadas por la rotación de las masas en movimiento, Figura 4-17. La fuerza del cigüeñal tiene el mismo sentido que la dirección de rotación del cigüeñal, su valor varía en función de la fuerza de la biela y del régimen de giro del motor, y la dirección depende de la fuerza de la biela (Fb) y de la fuerza centrífuga (Fc). Para definir la fuerza del cigüeñal (Ft) se precisa de especificar: la dirección, el sentido y el rango de valores de dicha fuerza.
- El rendimiento es la pérdida de energía debido a la fricción de los elementos. Este rendimiento se puede calcular comparando la fuerza real que se obtiene para generar el par motor (Ft-real) con la fuerza teórica esperada (Ft). El rendimiento se puede formalizar mediante el valor del porcentaje obtenido tras la comparación.
- La durabilidad es el número de ciclos que debe resistir este componente durante su funcionamiento. Es decir, la vida útil de la biela. Se formaliza mediante el valor

numérico del número de ciclos que tiene que soportar el componente pudiendo cumplir con la funcionalidad.

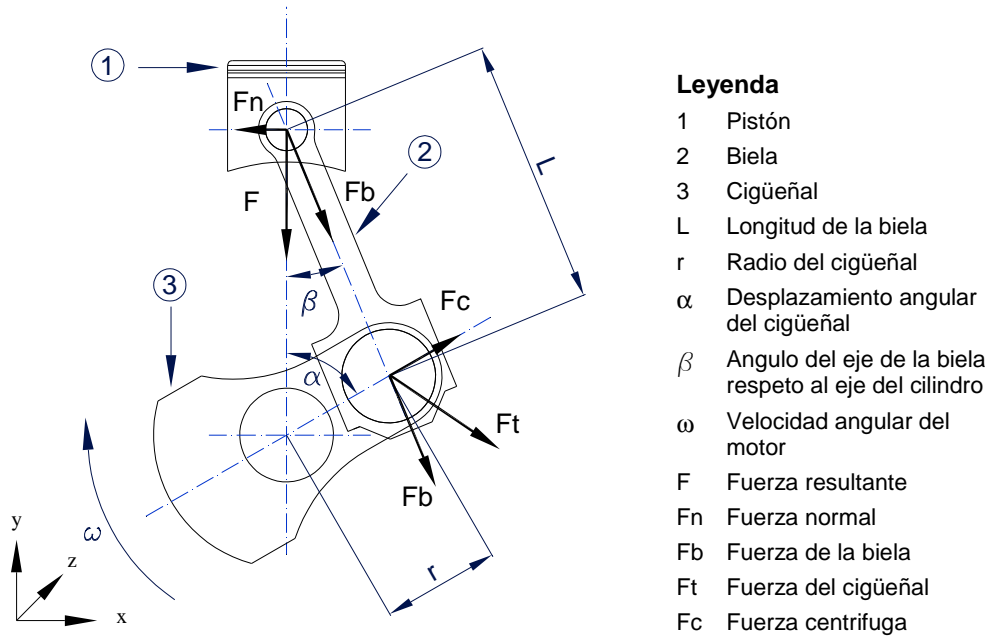


Figura 4-17: Esquema de las fuerzas asociadas a la biela

Las restricciones de entorno que limitan esta función son las mismas restricciones de entorno que afectan al primer requerimiento funcional (FR1), es decir la temperatura y agentes químicos agresivos.

Las restricciones de diseño, tomadas de la Tabla 4-3 de la sección 4.3.2, que afectan a este requerimiento son: la masa, el coste de la biela, y el volumen de espacio disponible en el pistón y en el cigüeñal.

Considerando este conjunto de información asociada a este requerimiento funcional, la matriz de formalización para el segundo requerimiento funcional (FR2) se expone en la Tabla 4-7. Los valores de la tabla son aproximaciones representativas para la biela de MCIA para vehículos de automóvil. Cuando el valor está representado por el símbolo *, significa que no se disponen de valores para dicha restricciones; aunque deberían añadirse para el diseño de este componente.

FORMALIZACION DE UN FRs				
Nivel predecesor de FRs		--		
Código requerimiento		FR2		
Descripción requerimiento		Transmitir la fuerza del pistón al cigüeñal		
FUNCION				
	Acción (verbo)	Objeto (Flujo)		
Función	Transmitir	fuerza		
Tipo de Restricción	Descripción de la restricción (Cs)	Valor	Unidades	Tolerancia
Entrada	Fuerza del pistón	Dirección Y		
	- Dirección de la fuerza	Alterno		
	- Sentido de la fuerza	*	N	*
Salida	Fuerza del cigüeñal	Depende de Fb y de Fc		
	- Dirección de la fuerza	Rotacional cíclico		
	- Sentido de la fuerza	*	N	*
	- Rango de valores	*	%	*
	Rendimiento (η)	>10e6	ciclos	*
Entorno	Temperatura	[80-90]	°C	+/- 10
	Agente químico	Composición química		
Diseño	Restricciones de espacio alrededor del pistón			
	- Dirección X	*	mm	*
	- Dirección Y	*	mm	*
	- Dirección Z	*	mm	*
	Restricciones de espacio alrededor del cigüeñal			
	- Dirección X	*	mm	*
- Dirección Y	*	mm	*	
- Dirección Z	*	mm	*	
	Masa de la biela	[0.5-0.7]	kg	*
	Coste de la biela	[150-200]	€	*

Tabla 4-7: Matriz de formalización del FR2 de la biela

b. Definición de los requerimientos funcionales (FRs) de segundo nivel.

La definición de los requerimientos funcionales de segundo nivel se corresponde con las subfunciones de la jerarquía funcional expuesta en la Figura 4-15.

Definición de los requerimientos funcionales: FR11-FR12

Estos FRs se han definido para las subfunciones que la biela tiene que llevar a cabo para cumplir con la función de “conectar el pistón con el cigüeñal” (F1 de la Figura 4-15). Las acciones corresponden con los verbos activos de las funciones y los objetos con el flujo de energía de cada una de ellas (Tabla 4-8)

	Acción (verbo)	Objeto (flujo)
FR11	Conectar	Material (pistón-biela)
FR12	Conectar	Material (biela-cigüeñal)

Tabla 4-8: Definición de las funciones de los requerimientos FR11 y FR12

Las restricciones de entrada, salida y de entorno que afectan a cada una de las funciones se resumen en la Tabla 4-9.

Tipo de restricciones	FR11	FR12
Entrada	Número de elementos a unir	Número de elementos a unir
	Dinámica del pistón	Dinámica del cigüeñal
Salida	Dinámica relativa entre el pistón y la biela	Dinámica relativa entre la biela y el cigüeñal
	Desgaste	Desgaste
Entorno	Temperatura	Temperatura
	Agentes químicos	Agentes químicos

Tabla 4-9: Definición de los calificadores de los requerimientos FR11 y FR12

La matriz de formalización de estos FRs se puede realizar tomando las restricciones correspondientes que ya están definidas en el FR1 y asignarles el valor correspondiente para dicho requerimiento. Pues como ya se ha comentado al inicio del apartado 4.3.3.1 las restricciones de los requerimientos funcionales de primer nivel se heredan hacia los niveles posteriores (Suh, 2001). La Tabla 4-10 muestra la formalización del FR11.

FORMALIZACION DE UN FRs				
Nivel predecesor de FRs		FR1		
Código requerimiento		FR11		
Descripción requerimiento		Unir el pistón y la biela		
FUNCION				
	Acción (verbo)	Objeto (Flujo)		
Función	Unir	Material (el pistón y la biela)		
Tipo de Restricción	Descripción de la restricción (Cs)	Valor	Unidades	Tolerancia
Entrada	Número elementos a unir	2	elementos	--
	Dinámica del pistón	Lineal respecto eje Y		
	- Trayectoria	0	--	--
	- Desplazamiento y velocidad angular en cualquier dirección	0	--	--
	- Desplazamiento y velocidad lineal en dirección X y Z	*	mm	*
	- Desplazamiento en dirección Y (δy), (= carrera del pistón)	*	m/s	*
- Velocidad en dirección Y (V_y)	+/- respecto al eje Y			
- Dirección del desplazamiento y movimiento				
Salida	Dinámica relativa del pistón-biela	Rotación		
	- Desplazamiento angular relativo en el plano X-Y (ϕ_{x-y})	*	°	*
	- Velocidad angular respecto Z (ω_z)	*	rad/s	*
	Desgaste	>10e6	ciclos	
Entorno	Temperatura	[80-90]	°C	+/- 10
	Agente químico	Composición química		
Diseño	Tiene que ser desmontable	--	--	--
	Restricciones de espacio alrededor del pistón			
	- Dirección X	*	mm	*
	- Dirección Y	*	mm	*
	- Dirección Z	*	mm	*
	Restricciones de espacio alrededor del cigüeñal			
	- Dirección X	*	mm	*
- Dirección Y	*	mm	*	
- Dirección Z	*	mm	*	
	Masa de la biela	[0.5-0.7]	kg	*
	Coste de la biela	[150-200]	€	*

Tabla 4-10: Matriz de formalización del FR11 de la biela

Definición de los requerimientos funcionales: FR21-FR22-FR23

Estos requerimientos funcionales (FRs) se han definido para las subfunciones que la biela tiene que llevar a cabo para cumplir con la función de “transmitir las fuerzas del pistón al cigüeñal” (F2 de la Figura 4-15). Las acciones responden a los verbos activos de las funciones, y los objetos con el flujo de energía de cada una de ellas (Tabla 4-11)

	Acción (verbo)	Objeto (flujo)
FR21	Recibir	fuerza (del pistón)
FR22	Transmitir	fuerza (generada en la biela)
FR23	Proporcionar	fuerza generada en la biela al cigüeñal

Tabla 4-11: Definición de las funciones de los requerimientos funcionales FR21, FR22 y FR23

Las restricciones de entrada, salida y de entorno que afectan a cada uno de los FRs citados en la Tabla 4-11 se resumen en la Tabla 4-12

Tipo de restricciones	FR21	FR22	FR23
Entrada	Fuerza del pistón	Fuerza de la biela	Fuerza generada en la biela al cigüeñal
Salida	Tensión máxima	Tensión máxima	Tensión máxima
	Deformación máxima	Deformación máxima	Deformación máxima
	Rendimiento	Rendimiento	Rendimiento
	Durabilidad	Durabilidad	Durabilidad
Entorno	Temperatura	Temperatura	Temperatura
	Agentes químicos	Agentes químicos	Agentes químicos

Tabla 4-12: Definición de los calificadores de los requerimientos FR21, FR22 y FR23

Las restricciones de la Tabla 4-12 son, en su mayoría, las mismas que las que afectan al FR2, exceptuando la “fuerza de la biela” como restricción de entrada, y la “tensión” y la “deformación” como restricciones de salida.

- La fuerza de la biela

La biela es un sólido biarticulado en el cual las fuerzas se transmiten a lo largo de su longitud. La fuerza de la biela (F_b) deriva de la descomposición de la fuerza del pistón a lo largo de la dirección de la misma, como ya se ha visto anteriormente en la Figura 4-17. Del mismo modo que la fuerza del pistón y la fuerza del cigüeñal, la fuerza de la biela se definirá con: una dirección, un sentido y un valor.

- Tensión máxima: es el esfuerzo máximo que puede soportar un elemento sin deformarse permanentemente (Shigley y Mischke, 1998). Se formaliza mediante un valor, las unidades y la tolerancia.

- Deformación máxima: es el grado de alargamiento por unidad de longitud que sufre un cuerpo como consecuencia de estar sometido a un estado de carga (Shigley y Mischke, 1998). Se formaliza mediante un valor, las unidades y la tolerancia.

La matriz de formalización se muestra para el requerimiento funcional FR22, Tabla 4-13. Para formalizar los otros requerimientos, FR21 y FR23, bastaría con tomar la definición de las restricciones que ya están definidas en el FR2 y en este FR22, y asignarles el valor correspondiente.

FORMALIZACION DE UN FRs				
Nivel predecesor de FRs	FR2			
Código requerimiento	FR22			
Descripción requerimiento	Transmitir la fuerza de la biela			

FUNCION		
	<i>Acción (verbo)</i>	<i>Objeto (Flujo)</i>
Función	Transmitir	fuerza (de la biela)

<i>Tipo de Restricción</i>	Descripción de la restricción (Cs)	Valor	Unidades	Tolerancia
Entrada	Fuerza de la biela - Dirección de la fuerza - Sentido de la fuerza - Rango de valores	Paralela al eje longitudinal de la biela Alterno *	N	*
Salida	Tensión máxima	*	Pa	*
	Deformación elástica	*	mm	*
	Rendimiento (η)	*	%	*
	Durabilidad	>10e6	ciclos	*
Entorno	Temperatura	[80-90]	°C	+/- 10
	Agente químico	Composición química		
Diseño	Restricciones de espacio alrededor del pistón - Dirección X - Dirección Y - Dirección Z	*	mm	*
		*	mm	*
		*	mm	*
	Restricciones de espacio alrededor del cigüeñal - Dirección X - Dirección Y - Dirección Z	*	mm	*
		*	mm	*
		*	mm	*
	Masa de la biela	[0.5-0.7]	kg	*
	Coste de la biela	[150-200]	€	*

Tabla 4-13: Matriz de formalización del FR22 de la biela

Dominio físico

Etapa II: Identificar los parámetros de diseño (DPs)

Antes de iniciar esta etapa de la metodología se ha requerido de disponer de las estructuras físicas que forman la estructura de la biela y de las funciones que cada una de estas estructuras tiene que satisfacer. Pues como se ha expuesto en la etapa II del Capítulo 3, en primer lugar se tienen que identificar las estructuras físicas y posteriormente los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen las funciones de las mismas.

Es ampliamente conocido que la biela se compone de tres estructuras físicas: la cabeza, el cuerpo y el pie, Figura 4-18. El conjunto de funciones que cada una de las estructuras tiene que satisfacer se pueden obtener tomando la jerarquía funcional de la biela, Figura 4-19.



Figura 4-18: Estructuras físicas de la biela

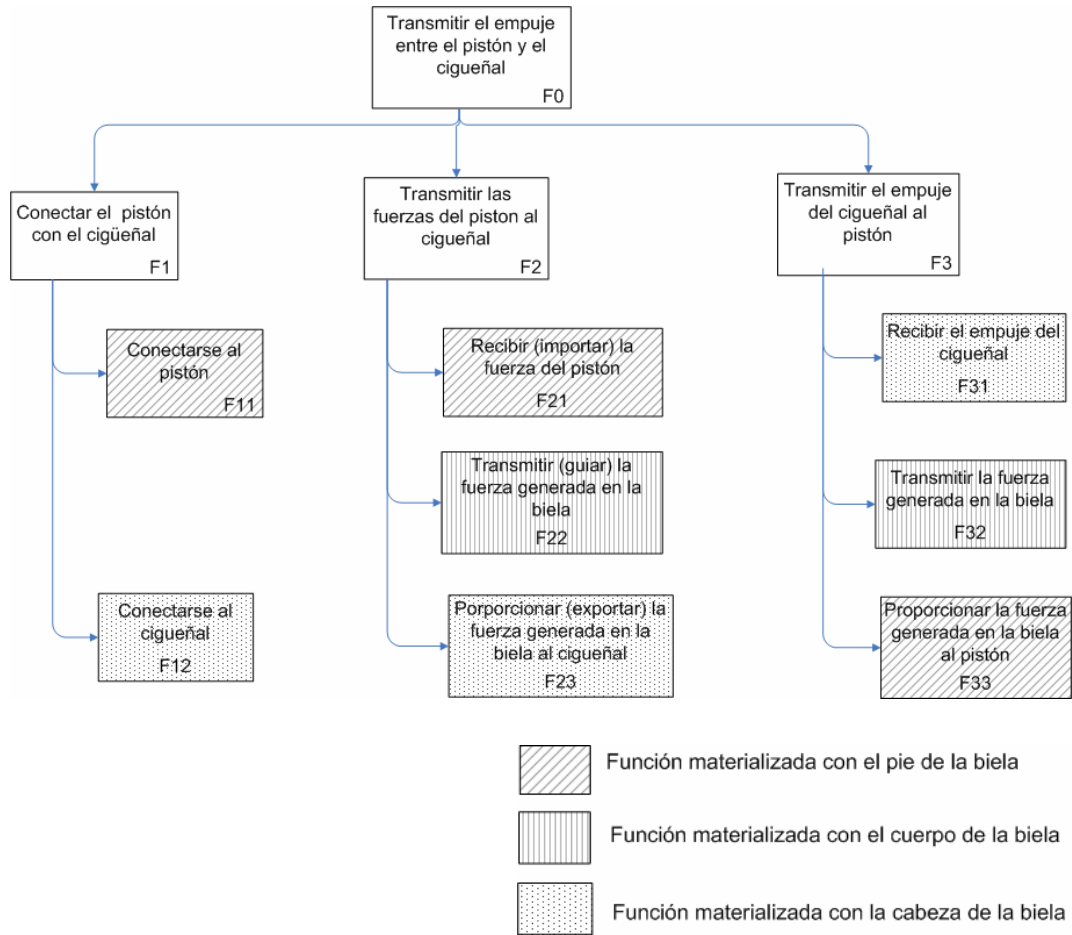


Figura 4-19: Funciones de las estructuradas físicas de la biela

Los requerimientos funcionales (FRs), definidos y formalizados en la etapa I para cada una de estas funciones, se han utilizado para determinar los parámetros de diseño (DPs) que configuran el diseño de la biela.

No obstante, hay que puntualizar que para conseguir obtener todos los DPs se debería hacer búsquedas repetitivas e iterativas de DPs que cumplieran con estos FRs a lo largo de las diferentes fases del diseño. Considerando la magnitud que esto hubiera generado al caso que se expone en esta tesis, en esta aplicación se ha realizado una sola iteración para buscar los DPs que satisfacen a los FRs de cada una de las estructuras físicas.

Con esta iteración se han determinado: los parámetros de diseño (DPs) del cuerpo de la biela que satisfacen el FR22, los DPs del pie de la biela que satisfacen el FR11 y el FR21, y los DPs del cuerpo de la biela que satisfacen el FR12 y FR23. Se recuerda que los DPs se definen para satisfacer los FRs de las estructuras físicas (etapa II del Capítulo 3), por ello se buscan para satisfacer el segundo nivel de FRs.

La búsqueda de los parámetros de diseño (DPs) que satisfacen a los requerimientos funcionales que pertenecen a un mismo FRs de primer nivel se ha realizado de forma similar. Así pues, la explicación de la obtención de los DPs se ha agrupado en dos apartados: los parámetros de diseño (DPs) que se definen para satisfacer los requerimientos funcionales: FR11 y FR12, y los DPs que se definen para satisfacer los requerimientos funcionales: FR21, FR22 y FR23

a. Parámetros de diseño (DPs) para satisfacer FR11 y FR12

Para conectar los tres elementos (el pistón, la biela y el cigüeñal) es necesario inicialmente analizar los movimientos que tienen de cada uno de ellos. Como bien indican las restricciones de estos requerimientos funcionales, el pistón tiene un movimiento de traslación lineal, la biela un movimiento de roto-traslación y el cigüeñal de rotación, lo cual significa que la unión entre ellos no puede ser rígida. Esto conduce a que esta unión tenga que ser de tipo junta. Una junta es la conexión entre dos o más elementos que permite tener algún movimiento entre ellos (Norton, 2005).

Pie de la biela – FR11

El pie de la biela tiene que trasladarse solidariamente con el pistón y al mismo tiempo tiene que poder rotar para moverse solidariamente con el cigüeñal. Esto significa que la junta de unión entre el pistón y el pie biela debe tener dos grados de libertad, por lo tanto debe ser una junta deslizante y rodante (Norton, 2005).

Las paredes del cilindro representan la deslizadera, por lo tanto en ese sentido no hay que definir ningún DP. Sin embargo para conseguir la rotación se precisa de un elemento intermedio entre el pistón y el pie de la biela denominado el bulón del pistón. Como se ha comentado en el apartado 4.1, el bulón es el elemento que conecta el pistón con la biela y permite el movimiento de rotación.

El hecho de precisar del bulón como elemento intermedio, genera que en el pie de la biela deberá realizarse una característica de diseño, concretamente un agujero que permita esta conexión. Pero considerando las restricciones durabilidad asociada a este requerimiento se debe añadir un elemento intermedio entre ambos, como puede ser un cojinete de fricción. Tanto las dimensiones del bulón como las del cojinete están condicionadas por las fuerzas analizadas en la sección 4.2.2. Los resultados de estas dimensiones determinan las dimensiones del agujero del pie de la biela. La tolerancia del agujero estará condicionada también por el cojinete de fricción.

La Tabla 4-14 muestra un resumen de los DPs que se precisa definir para satisfacer el requerimientos funcional FR11.

Pie de la biela		
Análisis para obtener el DP	Parámetro de diseño	Especificación
Grados de libertad de la unión y tipo de unión	Característica de diseño	Selección
Elementos colindantes de la unión.	Dimensiones de la característica de diseño	Numérico

Tabla 4-14: DPs del pie de la biela para satisfacer el FR11

Cabeza de la biela – FR12

La cabeza de la biela tiene que rotar solidariamente con el codo del cigüeñal. Esto significa que la junta de unión debe tener un grado de libertad, por lo tanto debe ser una junta rodante (Norton, 2005).

Del mismo modo que sucedía en el pie de la biela, para conseguir la rotación se precisa de un elemento intermedio entre la biela y el codo cigüeñal. En este caso este elemento intermedio está integrado en el mismo cigüeñal, con las denominadas muñequillas del cigüeñal (ver apartado 4.1)

La geometría de la muñequilla, que permite unir la biela con el codo del cigüeñal, genera que en la cabeza de la biela se debe añadir una característica de diseño, concretamente un agujero, que permita esta conexión. Considerando la geometría del codo del cigüeñal, esta conexión debe ser partida para poder cumplir con la restricción de ser montable y desmontable. Sin embargo, los parámetros de diseño (DPs) que se derivan de ello podrían considerarse en fases posteriores del diseño.

Como la restricción de durabilidad también está presente en este requerimiento también se debe añadir un elemento intermedio entre ambos. Este cojinete de fricción también tienen que ser partido.

Tanto las dimensiones las muñequillas como las del cojinete están condicionadas por las fuerzas analizadas en el apartado anterior. Los resultados de estos análisis determinan las dimensiones del agujero de la cabeza de la biela y la tolerancia del mismo.

La Tabla 4-15 muestra un resumen de los DPs que se precisa definir para satisfacer el requerimientos funcional FR12.

Cabeza de la biela		
Análisis para obtener el DP	Parámetro de diseño	Especificación
Grados de libertad de la unión y tipo de unión	Característica de diseño	Selección
Elementos colindantes de la unión.	Dimensiones de la característica de diseño	Numérico

Tabla 4-15: DPs de la cabeza de la biela para satisfacer el FR12

b. Parámetros de diseño (DPs) para satisfacer FR21, FR22 y FR23

La información formalizada en cada uno de estos requerimientos, concretamente la restricciones de función, ha sido el motor para identificar los parámetros de diseño (DPs). Pues se ha considerado que el análisis de los esfuerzos que generan las fuerzas de cada uno de ellos es un buen método para identificarlos.

Para analizar los esfuerzos es importante tener presente el tipo de fuerzas que tiene que soportar cada una de las estructuras físicas de la biela. Aunque estas fuerzas ya se han definido a lo largo de este capítulo, se recuerdan en la Tabla 4-16 y en la Figura 4-20

Estructura física	Fuerza	Ecuaciones
Pie	F resultante del pistón	$Fr = Fgas \pm Fi$
Cuerpo	F biela	$Fb = \frac{Fr}{\cos \beta}$
Cabeza	F biela F centrífuga	$Fb = \frac{Fr}{\cos \beta}$ $Fc = m_c * \omega^2 * r_c$

Tabla 4-16: Fuerzas de cada una de las estructuras físicas de la biela

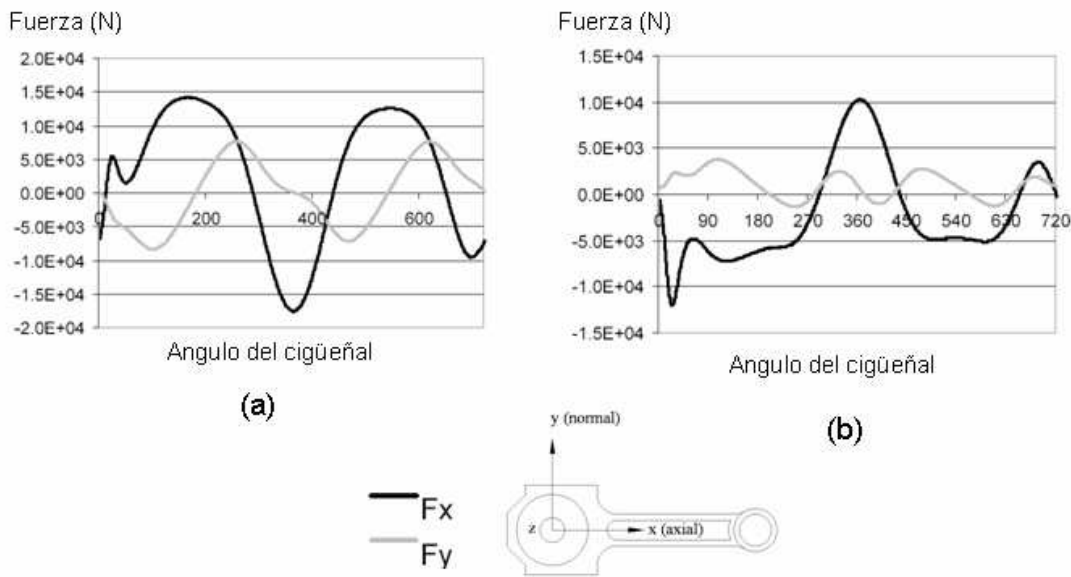


Figura 4-20: Fuerzas en los extremos de la biela: a) Cabeza de la biela, b) pie de la biela (fuente de: (Shenoy, 2004))

El análisis de esfuerzos de este componente se puede realizar de dos formas distintas: a) mediante formulación analítica y b) utilizando métodos numéricos, como los métodos de elementos finitos (*Finite Element Methods, FEM*)

- La formulación analítica se debería aplicar a todas las secciones consideradas más críticas de la biela. Aunque considerando el complejo estado de carga al cual está sometida, este procedimiento resulta bastante largo. Además, si se añade que la biela tiene que tener la máxima resistencia con el mínimo peso, el ajuste exacto de sus dimensiones tiene un papel clave en esta restricción. Lo cual implica tener que analizar más secciones, a parte de las consideradas críticas.
- Con el objetivo de simplificar este procedimiento y para conseguir la máxima resistencia con el mínimo peso, los métodos de elementos finitos (FEM) se han convertido en un procedimiento clave en el diseño de este componente. Esto no significa que el uso de los sistemas FEM sea sencillo, pues realmente se requiere de alto nivel de experiencia para su utilización. No obstante este sistema proporciona los esfuerzos de toda la geometría de la pieza, lo cual permite hacer un estudio muy detallado de las distintas secciones de la misma. Consecuentemente se puede obtener un diseño más optimizado desde el punto de vista de la relación resistencia-peso.

En esta tesis se ha considerado que para identificar los principales parámetros de diseño (DPs) que hay que definir para satisfacer los FR en una fase inicial de diseño, es suficiente con utilizar la formulación analítica. En cambio, para determinar los DPs de forma más específica sería conveniente el uso de los sistemas FEM.

Las fuerzas de la anterior Tabla 4-16 generan diferentes tipos de esfuerzos en cada una de las estructuras físicas de la biela. Estos esfuerzos se resumen en la Tabla 4-17.

Estructura física	Esfuerzo generados por las fuerzas
Pie de la biela	Esfuerzo alterno de tracción/compresión Esfuerzo alterno cortante
Cuerpo de la biela	Esfuerzo alterno de tracción/compresión
Cabeza de la biela	Esfuerzo alterno de tracción/compresión Esfuerzo alterno cortante

Tabla 4-17: Esfuerzos de las estructuras físicas de la biela

Considerando estos esfuerzos, se han realizado los siguientes análisis para determinar los parámetros de diseño (DPs), Tabla 4-18.

Estructura física	Análisis de esfuerzos
Pie de la biela	Análisis estático de tracción/compresión Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga
Cuerpo de la biela	Análisis estático de tracción/compresión Análisis estático de pandeo Análisis de fatiga
Cabeza de la biela	Análisis estático de tracción/compresión Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga

Tabla 4-18: Análisis analíticos para determinar los parámetros de diseño (DPs) de la biela

- Análisis estático de tracción y compresión

Para el análisis estático de tracción y compresión se ha considerado la ecuación de los esfuerzos de tensión pura (Shigley y Mischke, 1998) :

$$\sigma = \pm \frac{F}{A} \quad (4-4)$$

Se toma el estado de carga máxima (F) al cual está sometida la estructura física para definir el área (A) de las secciones más críticas y calcular el esfuerzo (σ) al que están sometidas. Posteriormente, el esfuerzo (σ) de cada sección debe ser comparado con la resistencia última del material (S_y), considerando el coeficiente de seguridad (n) asignado a este componente (Shigley y Mischke, 1998):

$$\frac{\sigma}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (4-5)$$

- Análisis estático de la fuerza de pandeo

Para el análisis estático de pandeo se ha considerado que la fuerza máxima de compresión a la que puede estar sometida la biela no puede superar la fuerza crítica de pandeo propuesta por Euler (Shigley y Mischke, 1998)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (4-6)$$

Para calcular la fuerza límite de pandeo (P_{cr}) es necesario definir la inercia (I) de las secciones más críticas, de la parte de la biela que se está analizando, y el módulo elástico (E) del material. La longitud (L) y las condiciones de arrojamiento (K) están condicionadas por las restricciones de la biela. Esta fuerza límite debe ser

comparada con la máxima fuerza externa de compresión a la que está sometida la biela, considerando el coeficiente de seguridad asignado a este componente.

- Análisis estático de cortante.

Para el análisis estático de cortante se ha considerado la ecuación de los esfuerzos de cortante puro (Shigley y Mischke, 1998)

$$\tau = \frac{F_{\text{cortante}}}{A} \quad (4-7)$$

$$\tau_{\text{max}} = 0.5S_y$$

Se toma el estado de carga máxima al cula está sometida la estructura física para definir el área (A) de las secciones más críticas y calcular el esfuerzo (τ) al que está sometidas. Posteriormente, el esfuerzo de cada sección (τ) debe ser comparado con la resistencia última del material a cortante (τ_{max}), considerando el coeficiente de seguridad asignado a este componente

- Análisis dinámico de esfuerzo de fatiga

Para el análisis dinámico a fatiga, desde el punto de vista analítico, se ha considerado el uso de la ecuación de Goodman modificada (Afzal y Fatemi, 2003; Shenoy, 2004).

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (4-8)$$

Los esfuerzos alternos (σ_a) y constantes (σ_m) se pueden obtener de los análisis estáticos mostrados anteriormente. Por lo tanto, desde el punto de vista de los parámetros de diseño, mayoritariamente se pueden considerar los mismos que en el análisis de tracción-compresión y cortante.

En el análisis de fatiga también hay que considerar que la resistencia a fatiga de la pieza (S_e) está influenciada por: la resistencia a la fatiga del material (S_e') y varios parámetros de diseño (Shigley y Mischke, 1998). Entre ellos destacar: el acabado superficial (K_a), el tamaño de la sección (K_b), el tipo de carga (K_c), el factor de temperatura (K_d) y los defectos de la pieza (K_e).

$$S_e = S_e' * K_a * K_b * K_c * K_d * K_e \quad (4-9)$$

Esto significa que definir el acabado superficial de la pieza, las dimensiones de la sección y la presencia de defectos en la pieza final son parámetros de diseño importantes en el análisis a fatiga

Tras realizar el análisis correspondiente para cada una de las estructuras físicas, el resumen de los DPs que se tendrían que definir en cada caso se exponen en la Tabla 4-19, Tabla 4-20 y Tabla 4-21. La Figura 4-21 indica, desde un punto de vista general, las secciones que se consideran relevantes en la fase inicial de diseño de la biela.

Cuerpo de la biela		
Análisis para obtener el DP	Parámetro de diseño	Especificación
Análisis estático de tracción/compresión	Dimensiones de la sección - S3 - Espesor mínimo (e3) - Ancho máximo (a3) - Alto máximo (b3)	Numérico
Análisis estático de pandeo	Tipo de sección en - S3	Selección
Análisis de fatiga	Tipo material (composición química)	Selección
	Resistencia tracción	Numérico
Análisis de fatiga	Rugosidad	Numérico
	Límite a fatiga del material	Numérico
	Defectos pieza	Selección

Tabla 4-19: DPs del cuerpo de la biela para satisfacer el FR22

Pie de la biela		
Análisis para obtener el DP	Parámetro de diseño	Especificación
Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga	Dimensiones de la sección – S1 - Espesor mínimo (e1) - Alto máximo (b1)	Numérico
Análisis estático de tracción/compresión Análisis de fatiga	Dimensiones de la sección – S2 - Espesor mínimo (e2) - Alto máximo (d2) - Alto máximo (b2)	Numérico
Análisis estático de tracción/compresión	Tipo material	Selección
Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga	Resistencia tracción	Numérico
Análisis de fatiga	Rugosidad	Numérico
	Límite a fatiga del material	Numérico
	Defectos pieza	Selección

Tabla 4-20: DPs del pie de la biela para satisfacer el FR21

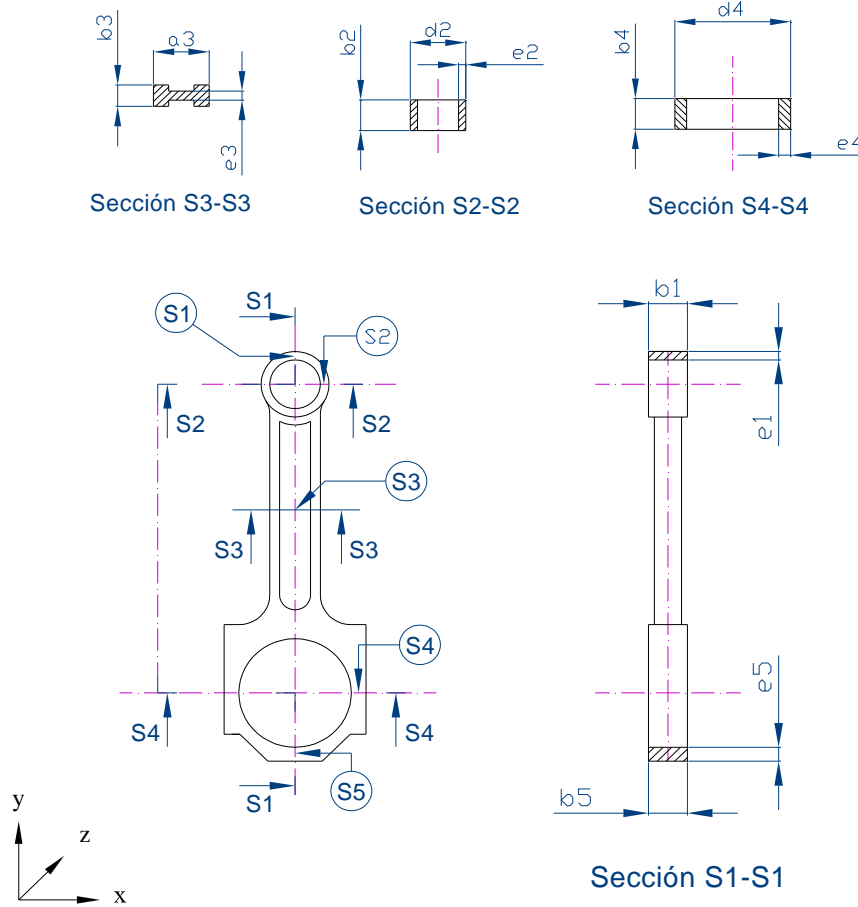


Figura 4-21: Secciones críticas para el cálculo de esfuerzos en la biela

Cabeza de la biela		
Análisis para obtener el DP	Parámetro de diseño	Especificación
Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga	Dimensiones de la sección – S4 - Espesor mínimo (e4) - Ancho máximo (d4) - Alto máximo (b4)	Numérico
Análisis estático de tracción/compresión Análisis de fatiga	Dimensiones de la sección – S5 - Espesor mínimo (e5) - Alto máximo (b5)	Numérico
Análisis estático de tracción/compresión Análisis estático de esfuerzo cortante Análisis de fatiga	Tipo material	Selección
	Resistencia tracción	Numérico
Análisis de fatiga	Rugosidad	Numérico
	Límite a fatiga del material	Numérico
	Defectos pieza	Selección

Tabla 4-21: DPs de la cabeza de la biela para satisfacer el FR22

c. Parámetros de diseño (DPs) asociados a las restricciones de diseño.

Como se ha visto en la formalización de los requerimientos funcionales, la mayoría de ellos tienen asociadas las restricciones de diseño de: la masa y el coste de este componente. El cumplimiento de estas restricciones se tendrá que tener en cuenta en la toma de decisiones de la mayoría de los DPs que se tienen que definir para satisfacer los FRs expuestos con anterioridad. Pues la masa se depende de la combinación de la geometría y el material, y el coste está asociado con aspectos geométricos, del material y también con aspectos de fabricación.

En relación con la restricción de diseño de la longitud de la biela, es importante en este componente considerar la tolerancia asociada a dicha longitud. Este parámetro de diseño satisface directamente al requerimiento funcional FR1 de la biela.

Etapa III: Definir y formalizar los parámetros de diseño (DPs)

Considerando los parámetros de diseño (DPs) que se han identificado en la etapa II, en esta sección se presenta la formalización de los DPs del pie de la biela que satisfacen el FR11 y algunos de los DPs del cuerpo de la biela que satisfacen el FR22, concretamente aquellos más relacionados con la resistencia a fatiga del cuerpo de la biela.

Los valores de los DPs corresponden con una biela de un MCIA para vehículos de automóvil de la empresa automovilística FIAT. El plano detallado de este componente se ha incluido en el Anexo III.

Requerimiento funcional		FR11
Estructura física		Pie de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Característica de diseño
	Especificación	Tipo selección
	Valor	Agujero pasante
Descripción		Este DP se ha obtenido del - Grados de libertad unión y tipo de unión

Tabla 4-22: Formalización de la característica de diseño

Requerimiento funcional		FR11
Estructura física		Pie de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Dimensiones de la característica de diseño
	Especificación	Tipo numérico
	Valor	ϕ26
	Unidades	mm
	Tolerancia	+/- 0.008
Descripción		Este DP se ha obtenido del - Bulón del pistón y del cojinete de fricción.

Tabla 4-23: Formalización de las dimensiones de la característica de diseño

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Espesor mínimo de la sección (S3- e3)
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	8
	Unidades	mm
	Tolerancia	[0/+0.04]
Descripción		Este DP se ha obtenido del: - Análisis estático de tracción/compresión - Análisis estático de pandeo - Análisis de fatiga

Tabla 4-24: Formalización del espesor mínimo de la sección

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Tipo de sección (S3)
	Especificación	Tipo selección
	Valor	Sección abierta tipo I
Descripción		Este DP se ha obtenido del <ul style="list-style-type: none"> - Análisis estático de tracción/compresión - Análisis estático de pandeo - Análisis de fatiga

Tabla 4-25: Formalización del tipo de sección

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Tipo de material
	Especificación	Tipo selección
	Valor	AISI 4340
Descripción		Este DP se ha obtenido del <ul style="list-style-type: none"> - Análisis estático de tracción/compresión - Análisis estático de pandeo - Análisis de fatiga

Tabla 4-26: Formalización del tipo de material

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Rugosidad
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	<12.5
	Unidades	μm
	Tolerancia	*
Descripción		Este DP se ha obtenido del <ul style="list-style-type: none"> - Análisis de fatiga

Tabla 4-27: Formalización de la rugosidad

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Límite a fatiga del material
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	[----]
	Unidades	Pa
Tolerancia		
Descripción		Este DP se ha obtenido del - Análisis de fatiga

Tabla 4-28: Formalización del límite a fatiga del material

Requerimiento funcional		FR22
Estructura física		Cuerpo de la biela
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	Presencia de defectos en la pieza
	Especificación	Tipo selección
	Valor	Baja
Descripción		Este DP se ha obtenido del - Análisis de fatiga

Tabla 4-29: Formalización de la presencia de defectos en la pieza

4.3.3.2. Fase II: Definición de la información de los procesos de fabricación

En la fase II se tienen que buscar todas las propiedades de proceso (PPs), para cada uno de los procesos que se pretende estudiar, que afectan para obtener los parámetros de diseño (DPs) definidos en la primera fase de la metodología. No obstante, en este trabajo la búsqueda ha sido acotada a los DPs que se han formalizado en la etapa III. Porque como ya se ha comentado, estos DPs incluyen aquellos que tienen más influencia en la resistencia a la fatiga y aquellos más representativos que hay que definir para satisfacer la función de conectar. Los DPs que se han analizado en este trabajo se resumen en la Tabla 4-30.

Parámetros de diseño analizados (DPs)
Espesor mínimo de sección
Rugosidad
Límite a fatiga del material
Tipo de sección
Tipo material
Presencia de defectos en la pieza
Características de diseño
Dimensiones de las características de diseño

Tabla 4-30: Parámetros de diseño (DPs) analizados en la segunda la fase de la metodología

Dominio proceso

Etapa IV: Elegir el proceso de fabricación.

Esta metodología ha sido aplicada a los dos procesos de fabricación que se están utilizando comúnmente en la fabricación de la biela: la forja en matriz cerrada (*Hot die forging, H/F*) y la forja de pulvimetalurgia (*Powder forging, P/F*). Además, también ha sido aplicada al proceso convencional de compactación y sinterizado de pulvimetalurgia (*Powder metal, P/M*). Como se ha comentado en el apartado 4.2.3.3, dos razones han impulsado a utilizar también este proceso. La primera, porque la preforma del forjado de pulvimetalurgia se obtiene mediante este proceso. La segunda, porque resulta un proceso técnicamente viable después de realizar una selección de procesos preliminar mediante CES Selector. Cada uno de ellos ha sido descrito en el apartado 4.2.3.3.

Etapa V: Identificar las propiedades de proceso (PPs)

Antes de empezar a identificar las propiedades de los procesos (PPs) es conveniente establecer la secuencia de los procesos de fabricación que se ha seguido para aplicar esta segunda fase de la metodología. En primer lugar la metodología se ha aplicado al proceso de forjado con matriz cerrada (H/F). En segundo lugar, al proceso convencional de compactación y sinterizado (P/M). En tercero, y último lugar, se ha aplicado al proceso de forjado de polvo de metal (P/F).

A pesar de ello, los resultados obtenidos para cada uno de los procesos de fabricación estudiados se van a exponer de forma integrada, a lo largo de las siguientes etapas de la metodología.

Después de analizar detalladamente cada uno de los procesos de estudio se ha concluido que todos los parámetros de diseño (DPs) mostrados en la Tabla 4-30 están afectados por los procesos analizados, Tabla 4-31.

	H/F	P/M	P/F
DPs	¿Afecta el proceso para obtener este DPs?	¿Afecta el proceso para obtener este DPs?	¿Afecta el proceso para obtener este DPs?
Espesor mínimo en sección	Si	Si	Si
Rugosidad	Si	Si	Si
Límite a fatiga del material	Si	Si	Si
Tipo de sección principal	Si	Si	Si
Tipo material	Si	Si	Si
Presencia de defectos en la pieza	Si	Si	Si
Características de diseño	Si	Si	Si
Dimensiones de las características de diseño	Si	Si	Si

Tabla 4-31: DPs afectados por cada uno de los procesos de fabricación de estudio

Para identificar las propiedades de los procesos (PPs), se ha aplicado el procedimiento de primera aplicación al proceso de forjado con matriz cerrada y el procedimiento de aplicación repetida a los demás procesos. Ambos procedimientos expuestos en la etapa V del Capítulo 3.

La Tabla 4-32 muestra el resultado de las propiedades de los procesos (PPs) identificadas tras aplicar dichos procedimientos a cada uno de los proceso de estudio.

	H/F	P/M	P/F
DPs	Nombre de la PP	Nombre de la PP	Nombre de la PP
Espesor mínimo en sección	Rango de espesor	Si	Si
	Ratio de secciones adyacentes	Si	Si
	Angulo de desmoldeo	No	No
Rugosidad	Rugosidad	Si	Si
Límite a fatiga del material	Tipo de material	Si	Si
	Anisotropía	No	No
		Porosidad	No
Tipo de sección principal	Tipo de sección	Si	Si
Tipo material	Tipo de material	Si	Si
	Requerimientos material	Si	Si
Presencia de defectos en la pieza	Defectos de fabricación	Si	Si
Características de diseño	Tipos de elementos característicos	Si	Si
Dimensiones de las características de diseño	Dimensiones de los elementos característicos	Si	Si

Tabla 4-32: PPs identificados para cada proceso

En la Tabla 4-32 la presencia de “SI“ significa que la propiedad se repite respecto al proceso inicial, el “NO” significa que la propiedad no se repite y un “nuevo nombre” indica una nueva propiedad identificada en el proceso.

Etapa VI: Definir y formalizar las propiedades de proceso (PPs)

En esta etapa se han definido las propiedades de los procesos (PPs) mostradas en la Tabla 4-32, se ha identificado el tipo de relación entre los parámetros de diseño (DPs) y las propiedades de los proceso (PPs), y finalmente se han formalizado dichas propiedades de los procesos (PPs)

a. Definición de las propiedades de proceso (PPs)

La definición de las propiedades de los procesos (PPs) identificadas en la etapa anterior son las siguientes:

Rango de espesor

El rango de espesor es el rango de grosores que el proceso es capaz de procesar (Ishii et al., 1991; Giachetti, 1997; Shercliff y Lovatt, 2001; Swift, 2003). El rango de espesor se define mediante un rango numérico. Por lo tanto la especificación es de tipo numérica que se expresa en milímetros.

Ratio de sección adyacente

El ratio de sección adyacente es el ratio que expresa la variación de espesor en una sección o en un cambio de secciones que el proceso es capaz de obtener (Esawi y Asbhy, 2000). Se representa mediante un valor numérico adimensional, pues se calcula mediante en cociente entre los dos espesores continuos. La especificación es de tipo numérica.

Angulo de desmoldeo

El ángulo de desmoldeo es la inclinación de las superficies perpendiculares al plano que une las dos partes de un molde. Tiene la finalidad de facilitar la extracción de la pieza una vez solidificada y de preservar el molde (Committee under ASM direction, 1988). El ángulo de desmoldeo se define mediante el rango de valores del ángulo respecto a eje de movimiento de la matriz (Committee under ASM direction, 1988; Bralla, 1999; Boothroyd et al., 2002; Swift, 2003). Por lo tanto la especificación es de tipo numérica que se expresa en grados.

Acabado Superficial

El acabado superficial se define como las irregularidades geométricas en la superficie de un material sólido (Committee under ASM direction, 1997). Por lo tanto en relación a un proceso, el acabado superficial es la apariencia o textura superficial que el proceso es capaz de obtener en un componente dado. El acabado superficial se define mediante el rango de valores numéricos (Committee under ASM direction, 1988; Bralla, 1999; Boothroyd et al., 2002; Swift, 2003). Consecuentemente la especificación es de tipo numérica que se expresa en micrómetros.

Tipo material

El tipo de material es el tipo de material, desde el punto de vista de la composición química, que el proceso es capaz de procesar. El tipo de material se define eligiendo como mínimo un elemento dentro de una lista de tipos de materiales (Bralla, 1999). Por lo tanto la especificación de esta propiedad es de tipo selección. Una lista de diferentes tipos de materiales se puede obtener de (Swift, 2003), Figura 4-22. Aunque también se podría especificar en referencia a una norma de materiales.

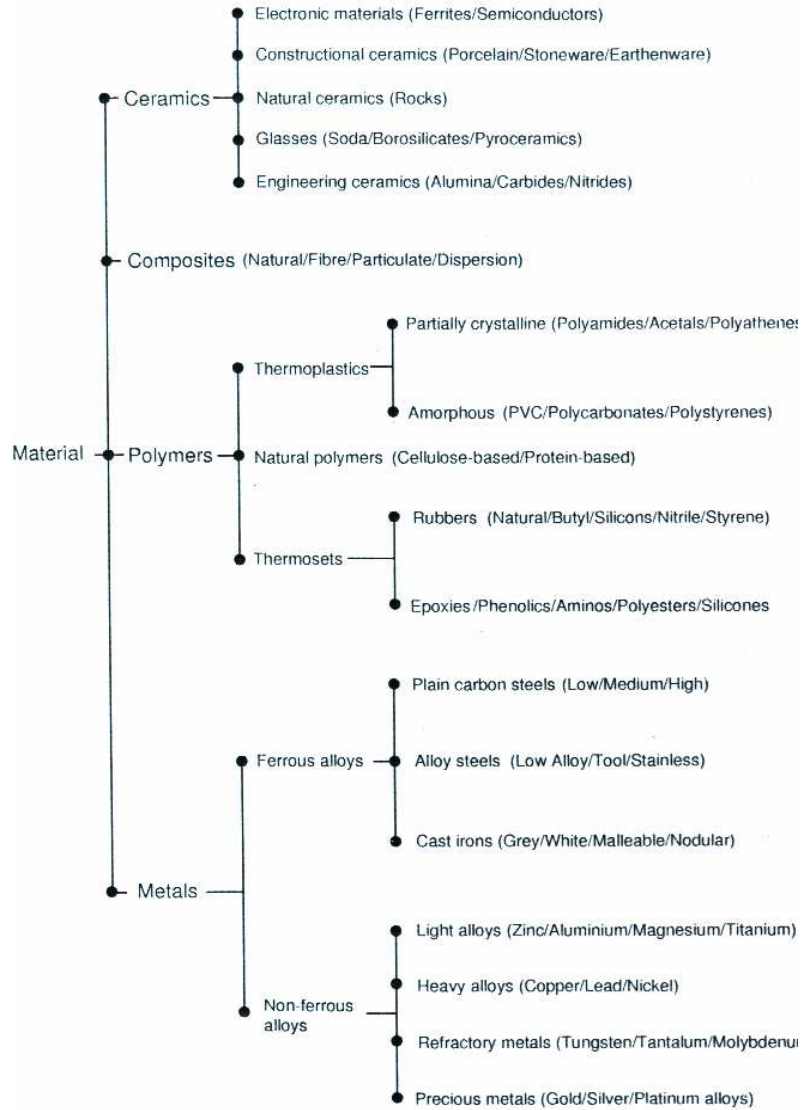


Figura 4-22: Clasificación de materiales (fuente de: (Swift, 2003).)

Anisotropía

La anisotropía es la característica de manifestar diferentes valores de una propiedad de una pieza en diferentes direcciones, respecto a un sistema de referencia fijado en el material (Committee under ASM direction, 1997)

La anisotropía es un fenómeno que surge como resultado de la deformación plástica del material y consiste en que los granos del material se alargan en la dirección de la deformación y se contraen en la dirección perpendicular a la misma. Como consecuencia las propiedades mecánicas de la pieza en dirección de la deformación son diferentes a las propiedades mecánicas en dirección perpendicular a la misma, y esto evidentemente afecta

a las propiedades del diseño (Kalpakjian y Schmid, 2001). Estas propiedades mecánicas aumentan en la dirección de deformación y disminuyen en la dirección perpendicular a la misma.

El hecho de que un proceso genere o no anisotropía en las propiedades mecánicas de una pieza se puede definir mediante dos opciones: sí o no. Por lo tanto es una especificación de tipos booleano. Pero en el caso que el proceso genere anisotropía también es conveniente especificar su dirección.

Porosidad

La porosidad se define como finos agujeros o poros dentro de un sólido. La cantidad de esos poros se expresa como un porcentaje del volumen total del sólido (Committee under ASM direction, 1997). A menudo este porcentaje es calculado comparando la densidad real de la pieza respecto a la densidad teórica esperada. Por lo tanto la especificación es de tipo numérica que se expresa con un porcentaje.

Tipo de sección

El tipo de sección es la sección transversal a lo largo del eje longitudinal de la pieza que el proceso es capaz de fabricar. El tipo de sección se define eligiendo como mínimo un elemento dentro de una lista de posibles de secciones. Por lo tanto la especificación de esta propiedad es de tipo selección. Una lista de posibles secciones se puede obtener de (Esawi y Asbhy, 2000), Figura 4-23.

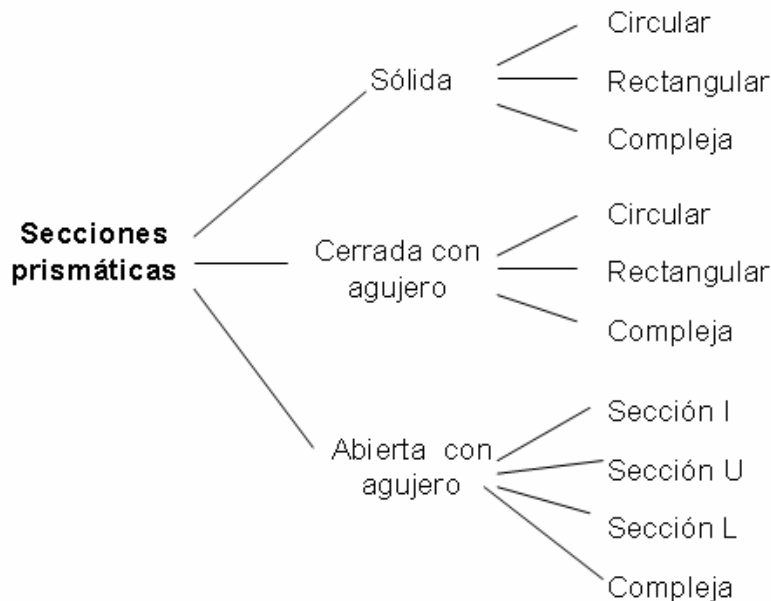


Figura 4-23: Clasificación de secciones (fuente de (Esawi y Asbhy, 2000))

Requerimientos del material

Los requerimientos de material incluyen aquellas restricciones específicas que el material debe cumplir para poder garantizar que la pieza es fabricable mediante un proceso determinado (Committee under ASM direction, 1988). Esta propiedad se define eligiendo como mínimo un elemento dentro de una lista de posibles de requerimientos de material. Por lo tanto la especificación de esta propiedad es de tipo selección.

Una lista de posibles restricciones del material podría incluir propiedades como: forjabilidad, resistencia a la fluencia (*flow stress*) o la maquinabilidad.

Defectos de fabricación

Son los defectos que se generan en la pieza como consecuencia del procesado. La especificación de esta propiedad es de tipo selección. La lista de los posibles defectos que pueden ser generados por el proceso de forja incluye (Committee under ASM direction, 1988): fisuras en la superficie, crecimiento de grano o decarburización.

Elementos característicos

Los elementos característicos son una interpretación de la geometría de la pieza desde el punto de vista tecnológico (Gonzalez, 2001). Esta propiedad se define eligiendo como mínimo un elemento dentro de una lista de posibles de elementos característicos. Es bastante conocido que en algunas ocasiones los elementos característicos pueden tener bastante relación con el proceso de fabricación, aunque en cualquier caso, la especificación de esta propiedad es de tipo selección.

Desde un punto de vista general, una lista de elementos característicos podría ser (Esawi y Asbhy, 2000): a) pasantes o no pasantes en la pieza, b) paralelos o perpendiculares a la dirección de ejecución del proceso o c) de forma constante o variable a lo largo de su longitud.

Desde un punto de vista más aplicado a un proceso de fabricación concreto, se destacan los elementos característicos de mecanizado propuestos en (ISO- STEP Part 224, 2001) Por ejemplo: agujero, radio, rosca o cajera. Aunque el uso de algunos de ellos se ha extendido a otros procesos de fabricación, como agujero o radio en la mayoría de procesos.

b. Tipo de relación entre los parámetros de diseño (DPs) y las propiedades de proceso (PPs)

Considerado los dos tipos de relación que pueden establecerse entre DPs y PPs, que se ha propuesto en la etapa VI del Capítulo 3, se exponen los resultados obtenidos para cada proceso de fabricación.

En las matrices de relación que se exponen a continuación, el tipo de relación primaria se simboliza con un 1, mientras que la relación secundaria con un 2. Se recuerda que la relación primaria significa que el valor del DP debe estar dentro del rango de valores del PP, o dicho de otro modo el PP tiene que ser necesariamente considerado para obtener

DP, en caso contrario el proceso de fabricación no sería válido para obtener dicho DP. Mientras que la relación secundaria simboliza que no necesariamente el valor del DP debe estar dentro del rango de PPs o que el PP puede no ser considerado para obtener ese DP, pues ese DP puede ser conseguido con otros procesos de fabricación u operaciones secundarias.

DPs	PPs del proceso H/F											
	Rango de espesor	Ratio de secciones adyacentes	Angulo de desmolde	Rugosidad	Tipo de material	Anisotropía	Tipo de sección	Tipo de material	Requerimientos material	Defectos de fabricación	Tipos de elementos característicos	Dimensiones de los elementos característicos
Espesor mínimo en sección	1	1	1									
Rugosidad				1								
Límite a fatiga del material					1	1						
Tipo de sección principal							1					
Tipo material								1	1			
Presencia de defectos en la pieza										2		
Características de diseño											2	
Dimensiones de las características de diseño												2

Tabla 4-33: Matriz del grado de relación entre DPs y los PPs del proceso de forja de matriz cerrada

DPs	PPs del proceso P/M										
	Rango de espesor	Ratio de secciones adyacentes	Rugosidad	Tipo de material	Porosidad	Tipo de sección	Tipo de material	Requerimientos material	Defectos de fabricación	Tipos de elementos característicos	Dimensiones de los elementos característicos
Espesor mínimo en sección	1	1									
Rugosidad			1								
Límite a fatiga del material				1	2						
Tipo de sección principal						1					
Tipo material							1	1			
Presencia de defectos en la pieza									2		
Características de diseño										2	
Dimensiones de las características de diseño											2

Tabla 4-34: Matriz del grado de relación entre DPs y los PPs del proceso de compactación y sinterizado

DPs	PPs del proceso P/F									
	Rango de espesor	Ratio de secciones adyacentes	Rugosidad	Tipo de material	Tipo de sección	Tipo de material	Requerimientos material	Defectos de fabricación	Tipos de elementos característicos	Dimensiones de los elementos característicos
Espesor mínimo en sección	1	1								
Rugosidad			1							
Límite a fatiga del material				1						
Tipo de sección principal					1					
Tipo material						1	1			
Presencia de defectos en la pieza								2		
Características de diseño									2	
Dimensiones de las características de diseño										2

Tabla 4-35: Matriz del grado de relación entre DPs y los PPs del proceso de forja de pulvimetalurgia

En las tres tablas, Tabla 4-33, Tabla 4-34 y Tabla 4-35, se observa que la mayoría de relaciones son primarias. Lo cual significa que la mayoría de PPs deben ser considerados para poder fabricar el componente con este proceso. Además también se observa que las relaciones son muy similares entre los tres procesos de fabricación. Esto se debe a la gran similitud entre los tres procesos que se han analizado en esta tesis.

Se ha considerado que los defectos de fabricación tienen un grado de relación secundaria porque algunos de ellos podrían ser aliviados mediante operaciones secundarias o tratamientos posteriores. Un ejemplo sería la decarburización para el proceso de forja en matriz cerrada o el proceso de forjado de polvo de metal. Aunque hay que puntualizar que esta relación no sería secundaria para otros defectos que no puedan aliviarse con operaciones secundarias, como sería el caso de las grietas internas en el proceso de forja en matriz cerrada y la penetración de óxidos en el proceso forja de polvo de metal. De ello se concluye que los defectos deberían estar más desagregados para poder contemplar esta relación con más precisión. Por este motivo se tratan un poco más detalladamente en la siguiente etapa VII.

La relación entre las características de diseño y los tipos de los elementos característicos, así como también la relación entre sus dimensiones, son secundarias porque los elementos característicos y sus dimensiones podrían ser obtenidos mediante operaciones secundarias de mecanizado.

En la Tabla 4-34 se considera que la relación de la porosidad con las propiedades mecánicas (límite a fatiga del material) es secundaria porque la porosidad se puede eliminar con procesos secundarios como la forja.

c. Formalización de las propiedades de proceso (PPs)

En este apartado se exponen las propiedades del proceso (PPs) formalizadas. Los valores de tipo numérico de cada una de las propiedades han sido cogido principalmente de la herramienta para seleccionar procesos CES Selector V4.5 y los valores de tipo selección se toman los ejemplos de las clasificaciones expuestas durante las definiciones de las propiedades de los procesos (PPs). Las dependencias de cada una de las propiedades de los procesos se extraen de la literatura especializada y de expertos. Aunque no se proporcionan en este trabajo todas las dependencias ni tampoco la variación de los valores de las propiedades de proceso en función de las mismas.

En las matrices de formalización de los PPs, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Una casilla con * significa que los valores que deberían ser añadidos a la matriz de formalización de cada propiedad de cada proceso
- Una casilla con -- significa que este campo no debe ser llenado para dicho proceso

Considerando estas puntualizaciones, la formalización de estas propiedades de producto se expone a continuación.

Propiedad de diseño (DP)		Espesor mínimo en sección		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Rango de espesor		
	Especificación	Tipo numérica		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	3-250	1,5-80	1,5-100
	Unidades	mm	mm	mm
	Tolerancia	*	*	*
	Dependencias	Material (Committee under ASM direction, 1988)	Tamaño y forma de la pieza. Los cuales a su misma vez dependen de: capacidad de las prensas, compresibilidad del polvo y nivel de densidad requerida por el producto (Committee under ASM direction, 1997)	*
Descripción		Esta propiedad especifica el rango de grosores que el proceso es capaz de obtener en una pieza		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-36: Formalización del rango de espesor

Propiedad de diseño (DP)		Espesor mínimo en sección		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Ratio de sección adyacente		
	Especificación	Tipo numérica		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	1--3	1--6	1--4
	Unidades	Adimensional	Adimensional	Adimensional
	Tolerancia	*	*	*
	Dependencias	Material (Committee under ASM direction, 1988)	Tamaño y forma de la pieza. Los cuales a su misma vez dependen de: capacidad de las prensas, compresibilidad del polvo y nivel de densidad requerida por el producto (Committee under ASM direction, 1997)	*
Descripción		Es el ratio que expresa la variación de espesor en una sección o en un cambio de secciones.		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-37: Formalización del ratio de sección adyacente

Propiedad de diseño (DP)		Espesor mínimo en sección		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Angulo de desmoldeo		
	Especificación	Tipo numérica		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	0-8	NO	NO
	Unidades	°	--	--
	Tolerancia	*	--	--
	Dependencias	Tipo de material (Bralla, 1999; Boothroyd et al., 2002), tipo de prensa y ubicación del ángulo (interno o externo) (Boothroyd et al., 2002)		
Descripción		El ángulo de desmoldeo es la inclinación de la superficies perpendiculares al plano de unión entre las dos partes de un molde y tiene la finalidad de facilitar la extracción de la pieza una vez solidificada y de preservar el molde		
Tipo de relación		Primaria	--	--

Tabla 4-38: Formalización del ángulo de desmoldeo

Propiedad de diseño (DP)		Rugosidad		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Rugosidad		
	Especificación	Tipo numérica		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	3,2-12,5	1,6-6,3	0,8-3,2
	Unidades	µm	µm	µm
	Tolerancia	*	*	*
	Dependencias	Material, tipo de máquina y condiciones de procesado (Committee under ASM direction, 1988)	Distribución del tamaño de las partículas (Committee under ASM direction, 1998) (Acabado de las herramientas de forja (Committee under ASM direction, 1998)
Descripción		Es la apariencia o textura superficial que el proceso es capaz de obtener en un componente dado.		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-39: Formalización de la rugosidad

Propiedad de diseño (DP)		Resistencia a la fatiga del material		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Tipo material		
	Especificación	Tipo selección		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	Metales ferrosos y no ferrosos. Composites metálicos	Metales ferrosos y no ferrosos Cerámicos. Composites cerámicos y metálicos.	Metales ferrosos y no ferrosos Composites metálicos
	Lista de selección	Clasificación de (Swift, 2003) (Figura 4-22)	Clasificación de (Swift, 2003) (Figura 4-22)	Clasificación de (Swift, 2003) (Figura 4-22)
	Dependencias	*	*	*
Descripción		El tipo de material es el tipo de material, desde el punto de vista de la composición química, que el proceso es capaz de procesar.		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-40: Formalización del tipo de material

Propiedad de diseño (DP)		Resistencia a la fatiga del material		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Anisotropía		
	Especificación	Tipo booleano		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	SI (dirección de deformación)	NO	NO
	Dependencias	Material de partida	--	--
Descripción		La anisotropía radica en que los granos del material se alargan en la dirección de la deformación y se contraen en la otra. Como consecuencia las propiedades mecánicas en dirección de la deformación son diferentes a las propiedades en dirección perpendicular a la misma.		
Tipo de relación		Primaria	--	--

Tabla 4-41: Formalización de la anisotropía

Propiedad de diseño (DP)		Resistencia a la fatiga del material		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Porosidad		
	Especificación	Tipo numérica		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	--	[>15]	--
	Unidades	--	%	--
	Tolerancia	--	*	--
Dependencias	--	Densidad requerida en la pieza final y densidad de compactación (Committee under ASM direction, 1998)		--
Descripción		La porosidad es el conjunto de finos agujeros o poros dentro de un sólido.		
Tipo de relación		--	Secundaria	--

Tabla 4-42: Formalización de la porosidad

Propiedad de diseño (DP)		Tipo sección		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Tipo sección		
	Especificación	Tipo selección		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	Sólida circular, rectangular, compleja. Sección tipo I, tipo U, tipo L. Sección abierta compleja	Todas las secciones	Sólida circular, rectangular, compleja. Sección tipo I, tipo U, tipo L. Sección abierta
	Lista de selección	CES Selector (Figura 4-23)	CES Selector (Figura 4-23)	CES Selector (Figura 4-23)
	Dependencias	Dirección del forjado, dimensiones pieza, ubicación línea partido	Dirección de compactación y dimensiones de la pieza	Dirección del forjado, dimensiones pieza y ubicación línea partido
Descripción		El tipo de sección es la sección transversal a lo largo del eje longitudinal de la pieza que el proceso es capaz de fabricar		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-43: Formalización del tipo de sección

Propiedad de diseño (DP)		Tipo material		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Requerimientos de material		
	Especificación	Tipo selección		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	Forjabilidad y resistencia a la fluencia (Committee under ASM direction, 1988)	Forma del polvo irregular y distribución del tamaño de las partículas (Committee under ASM direction, 1997)	Forma del polvo irregular y distribución del tamaño de las partículas (Committee under ASM direction, 1988)
	Lista de selección	*	*	*
Dependencias	*	Tipo de proceso de pulvimetalurgia (Committee under ASM direction, 1997)	*	
Descripción		Los requerimientos de material incluyen aquellas restricciones específicas que el material debe cumplir para poder garantizar que la pieza es fabricada mediante un proceso determinado		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-44: Formalización de los requerimientos del material

Propiedad de diseño (DP)		Tipo características de diseño		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Tipo elementos característicos		
	Especificación	Tipo selección		
	Proceso de fabricación	H/F	P/M	P/F
	Valor	Protuberancia, protusión, etc.	Agujero, protuberancia, protusión, etc.	Protuberancia, protusión, etc.
	Lista de selección	Lista de AP 224 (ISO- STEP Part 224, 2001)	Lista de AP 224 (ISO- STEP Part 224, 2001)	Lista de AP 224 (ISO- STEP Part 224, 2001)
	Dependencias	Dirección del forjado, ubicación línea partido	Dirección de la compactación	Dirección del forjado y ubicación línea partido
Descripción		El tipo de sección es la sección transversal a lo largo del eje longitudinal de la pieza que el proceso es capaz de fabricar		
Tipo de relación		Primaria	Primaria	Primaria

Tabla 4-45: Formalización del tipo de elementos característicos

Etapa VII: Definir y formalizar los defectos de fabricación

En la literatura relacionada con las bielas de MCIA se destacan una amplia diversidad de defectos que pueden ir asociados a cada proceso. Por ejemplo, según (Ilia et al., 2002; Afzal y Fatemi, 2003) para las bielas forjadas de polvo de metal los defectos de la superficie que afectan más a la fatiga son: la porosidad localizada, la penetración de óxidos y la decarburización. Según (Afzal y Fatemi, 2003), las bielas forjadas en caliente con matriz cerrada también esta afectadas por la decarburización, además de otros defectos mas generales como pueden ser las roturas internas que se pueden generar durante el proceso. Según (Paek et al., 1997) la variación de la masa que se produce en las bielas con ambos procesos es también un aspecto importante a considerar en el diseño de este componente.

A modo de ejemplo se formaliza el defecto de la decarburización que afecta a ambos procesos de fabricación con los cuales se fabrica actualmente las bielas de MCIA para vehículos de automóvil, Tabla 4-46.

Propiedad de diseño (DP)		Defectos de la pieza
Defecto de fabricación	Nombre del defecto	Decarburización
	Proceso de fabricación afectados	H/F y P/F
	Variables de ejecución (EVs)	- Temperatura del proceso inadecuada - Tiempo de calentamiento demasiado largo
Descripción		Reducción del contenido de carbón en la capa superficial de la pieza, debido al calentamiento por forjado
Tipo de relación		Secundaria
Procesos o tratamientos posteriores		Chorro con granalla de carbono (<i>Shoot peening</i>)

Tabla 4-46: Formalización del defecto de fabricación de decarburización

4.3.3.3. Resumen de aplicación de la metodología

A continuación se exponen dos diagramas que muestran un ejemplo del flujo de información que se genera en la aplicación de metodología que se ha explicado a lo largo de esta sección. La Figura 4-24 refleja la secuencialidad de la información de diseño de la fase I, en la que se incluye la información del dominio funcional y del dominio físico. La Figura 4-26 muestra el flujo de información de la información de proceso de la fase II, en la que se incluye la información del dominio de proceso.

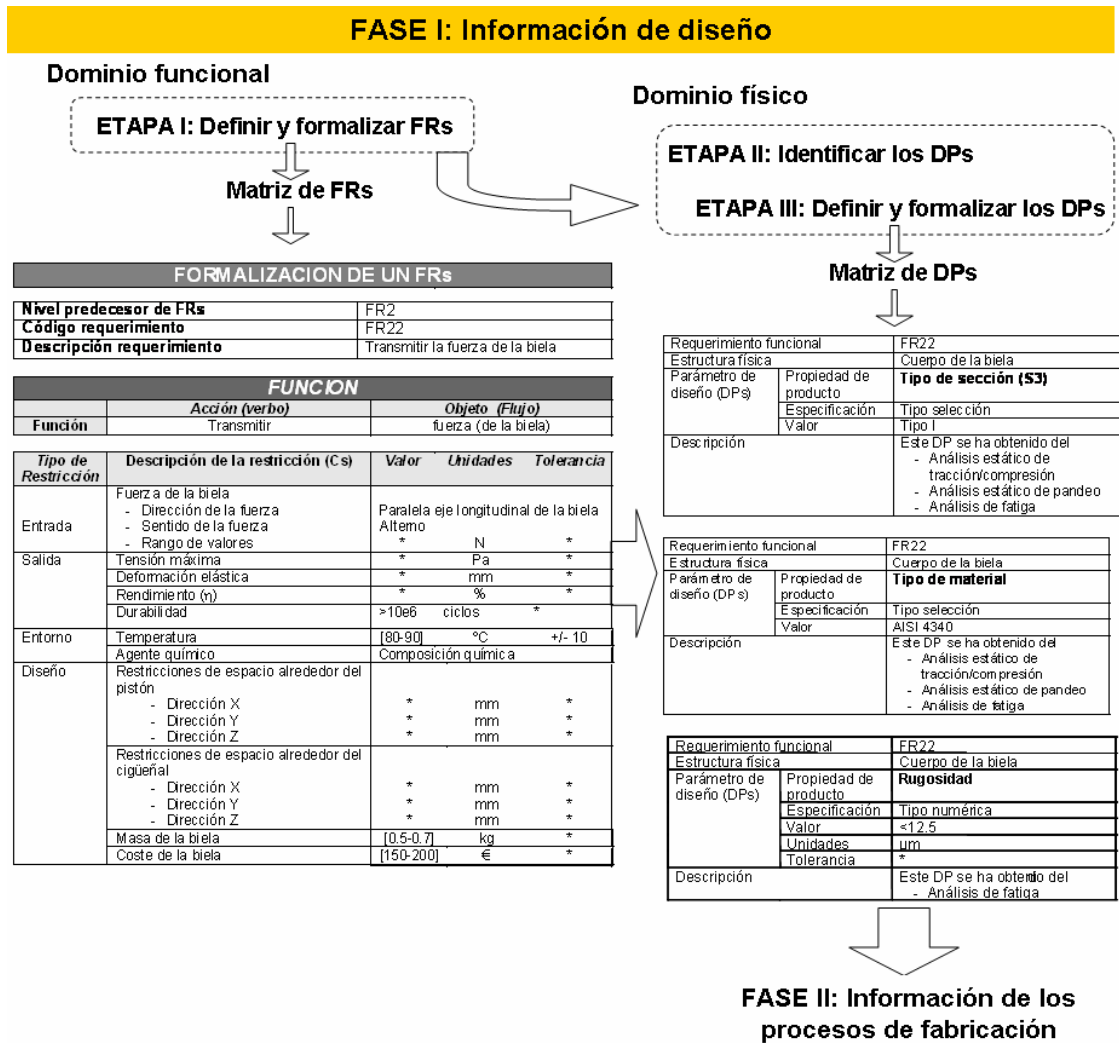


Figura 4-24: Ejemplo de la aplicación de la fase I de la metodología

FASE II: Información de proceso

Dominio de proceso

ETAPA IV: Seleccionar el proceso de fabricación → *Forja en matriz cerrada*

ETAPA V: Identificar las PPs para cada DP

DPs	Forja en matriz cerrada (H/F)
Rugosidad	Si
Tipo de sección principal	Si
Tipo material	Si

DPs	Forja en matriz cerrada (H/F)
Rugosidad	Rugosidad
Tipo de sección principal	Tipo de sección
Tipo material	Tipo de material Requerimientos material

ETAPA VI: Definir y formalizar las PPs

Matrices de PPs

Propiedad de diseño (DP)		Tipo sección
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de propiedad	Tipo sección
	Especificación	Tipo selección
	Proceso de fabricación	H/F
	Valor	Sólida circular, rectangular, compleja. Sección tipo I, tipo U, tipo L. Sección abierta compleja
	Lista de selección	CES Selector
Dependencias	Dirección del forjado, dimensiones pieza, ubicación línea partido	
Descripción		El tipo de sección es la sección transversal a lo largo del eje longitudinal de la pieza que el proceso es capaz de fabricar
Tipo de relación		Primaria

Propiedad de diseño (DP)		Resistencia a la fatiga del material
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Tipo material
	Especificación	Tipo selección
	Proceso de fabricación	H/F
	Valor	Metales ferrosos y no ferrosos. Composites metálicos
	Lista de selección	Clasificación propuesta por (Swift, 2003)
Dependencias	*	
Descripción		El tipo de material es el tipo de material, desde el punto de vista de la composición química, que el proceso es capaz de procesar.
Tipo de relación		Primaria

Propiedad de diseño (DP)		Tipo material
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	Requerimientos de material
	Especificación	Tipo selección
	Proceso de fabricación	H/F
	Valor	Forjabilidad y resistencia a la fluencia
	Lista de selección	*
Dependencias	*	
Descripción		Los requerimientos de material incluyen aquellas restricciones específicas que el material debe cumplir para poder garantizar que la pieza es fabricada mediante un proceso determinado
Tipo de relación		Primaria

Propiedad de diseño (DP)		Rugosidad
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de propiedad	Rugosidad
	Especificación	Tipo numérica
	Proceso de fabricación	H/F
	Valor	3,2-12,5
	Unidades	µm
Tolerancia	*	
Dependencias	Material, tipo de maquina, condiciones de procesado	
Descripción		Es la apariencia o textura superficial que el proceso es capaz de obtener en un componente dado.
Tipo de relación		Primaria

ETAPA VII: Definir y formalizar los Dfs

Matrices de Dfs

Propiedad de diseño (DP)		Rugosidad
Defecto de fabricación	Nombre del defecto	Grietas superficiales
	Proceso de fabricación afectados	H/F
	Variables de ejecución (EVs)	- Temperatura del proceso inadecuada - Deformación excesiva
Descripción		Grietas o fisuras en la superficie de la pieza
Tipo de relación		Primaria

Figura 4-25: Ejemplo de la aplicación de la fase II de la metodología

4.3.4. Aplicación de los resultados

Después de aplicar la metodología al caso, se dispone de información formalizada del diseño de la biela, que incluye FRs y DPs, e información formalizada de fabricación, que incluye las PPs y los Dfs de cada uno de los procesos analizados para este componente. Así como también de las relaciones entre FRs-DPs, DPs-PPs y DPs-Dfs.

Como se ha comentado en el apartado 3.5, incluyendo esta información de diseño y de fabricación en un sistema estructurado como el modelo de información propuesto en dicho apartado, se podría desarrollar, en trabajos futuros, un sistema experto que fuera capaz de proporcionar información de diseño y la información necesaria de fabricación para DFM en nuevos diseños.

A modo de ejemplo, en este apartado se plantea una breve reflexión de cómo se podría proporcionar esta información al diseñador, Figura 4-26.

- Para un nuevo diseño que tiene satisfacer una función que está incluida en dicho sistema estructurado, por ejemplo “transmitir una fuerza alterna”, el sistema podría proporcionar al diseñador los posibles parámetros de diseño (DPs) que debería definir para satisfacer esta función y su correspondiente formalización. Por ejemplo el “tipo de sección” o el “límite a fatiga del material”. El sistema le proporcionaría cómo debería definir los DPs y qué información debería buscar de cada uno de ellos (representado por las casillas vacías en la matriz de formalización de DPs). Se considera que estos DPs son posibles porque no se puede garantizar estas relaciones siempre sean válidas.
- Considerando que los posibles procesos de fabricación fueran los mismos que se han analizado en esta tesis, o algunos de ellos, la información necesaria de los procesos para DFM también podría ser suministrada. En la Figura 4-26 se muestran algunas de las propiedades de los procesos (PPs) que se podrían proporcionar para el parámetro de diseño “límite a fatiga del material”. Concretamente: “tipo de material” y “anisotropía”.

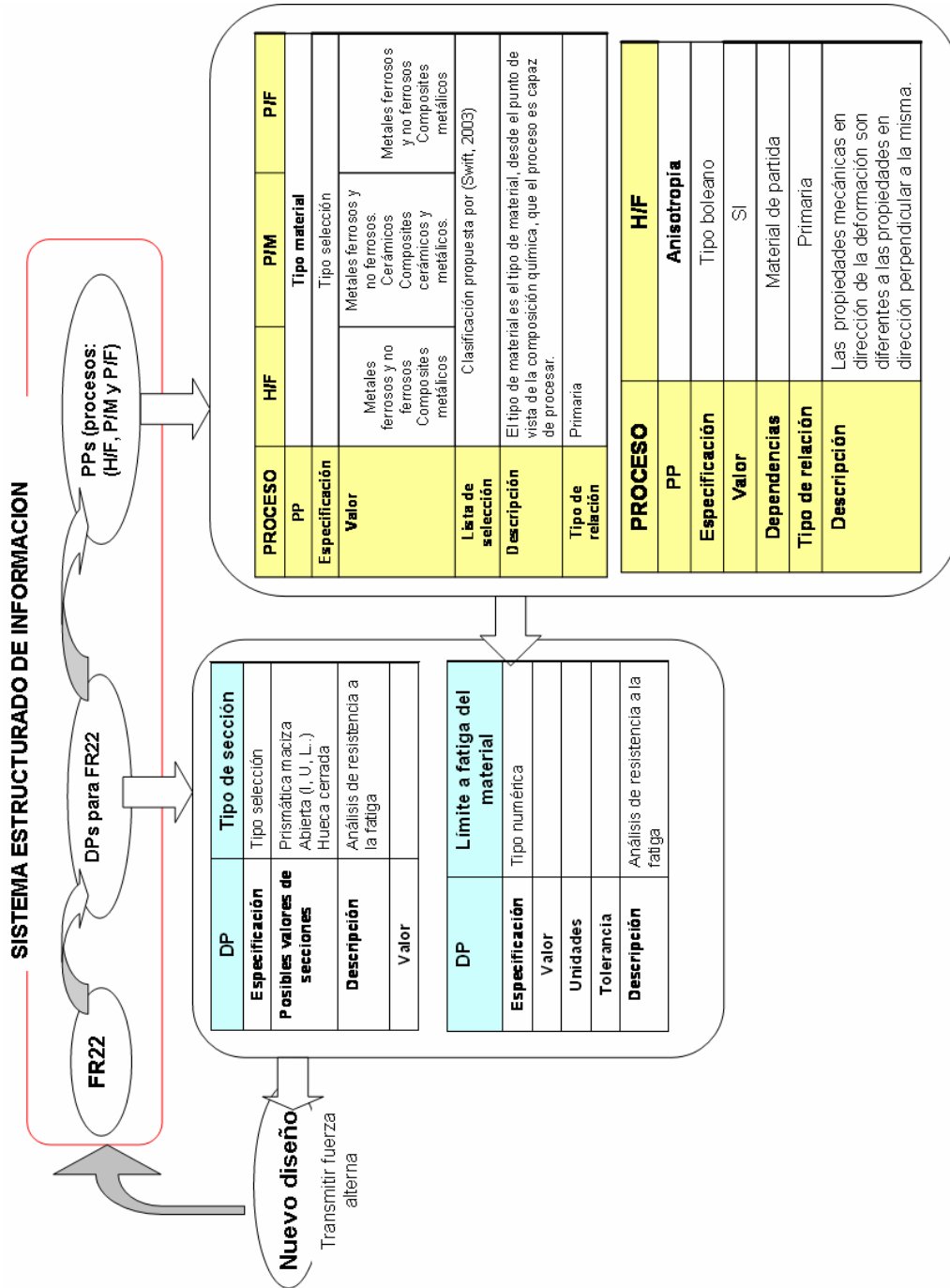


Figura 4-26: Ejemplo de aplicación de los resultados de la metodología

4.3.5. Comparación de la aproximación propuesta con la aplicación CES Selector

En esta sección se compara la aplicación de los resultados de la metodología propuesta en relación con la herramienta de selección de procesos con la que se ha estado trabajando durante el desarrollo de la tesis, CES Selector 4.5v. Aunque estas diferencias pueden parecer claras, pues CES Selector se encuadra en la selección de procesos y esta aproximación en el DFM, es interesante mostrar las diferencias.

La aproximación aquí propuesta difiere con CES Selector en los siguientes aspectos:

- Desde el punto de vista de la relación entre el diseño y el proceso de fabricación, CES proporciona la información desde diseño hasta el proceso. Se toma como punto de partida los valores de los requerimientos de producto, que incluyen propiedades de producto (material y forma) y ciertas restricciones del producto, como el tamaño de lote o el coste de producto, y en base a ellos se seleccionan un conjunto de procesos. Tras la selección se puede analizar como se debería modificar el rango de los requerimientos para que otros procesos también pudieran ser viables. En la aproximación que aquí se propone la información va desde el proceso de fabricación hasta el diseño. Se toma como punto de partida los parámetros de diseño (DPs) sin valor y se proporciona información de los procesos que puede afectar a dichos DPs. Con ello, las decisiones sobre los DPs se pueden tomar considerando la información de los procesos de fabricación.
- Desde el punto de vista de la formalización de la información, en CES Selector, la información de los procesos se formaliza para la selección, lo cual conlleva que la formalización deba ser adecuada para poder comparar, una a una, la información disponible de diseño con la información de los procesos de fabricación. En la aproximación propuesta, la información de los procesos se formaliza para DFM, consecuentemente la información debe ser más completa y más concreta para cada proceso. Por ejemplo, según CES Selector, el proceso de compactación y sinterizado de polvo de metal es válido fabricar la biela de un MCI, en cambio, la porosidad que este proceso genera no es adecuada para resistir la fatiga a la que está sometida la misma. Lo mismo podría pasar con la anisotropía de la forja en matriz cerrada para un diseño que deba tener las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones de la pieza.

Si una herramienta de selección, como CES Selector, pudiera proporcionar información al diseñador para cada requerimiento de producto, e incluso tuviera información más específica de cada proceso, sería equivalente a lo que aquí se está planteando. Sin embargo, considerando la amplia cantidad de procesos que pueden ser viables en las fases iniciales de diseño (como se ha visto en el apartado 4.2.3.3), resultaría excesivo poner a disponibilidad del diseñador la información necesaria de los procesos para DFM de cada uno ellos. Esto demuestra, que el uso de la aproximación que aquí se propone es adecuado cuando los procesos están más o menos acotados. De este modo se evita saturar al diseñador con excesiva información de los procesos de fabricación.

Es evidente que el objetivo de CES Selector es la selección de procesos y el objetivo de la aproximación aquí propuesta es el DFM. A pesar de ello, estas aproximaciones son complementarias, pues CES limita el conjunto de procesos sobre el cual se puede proporcionar la información necesaria de los procesos para DFM. Tal y como se ha reflejado en la aplicación de la metodología a la biela de un MCIA.

Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros

5.1. Conclusiones

Como se ha reflejado en esta tesis la integración de diseño y de fabricación requiere de considerar el proceso de diseño, el proceso de fabricación y la relación entre ambos. Considerando la amplitud de estos dos dominios, tanto del proceso de diseño como de los procesos de fabricación, y la fuerte dependencia de estos con la experiencia, se concluye que desde el punto de vista teórico, esta integración es bastante compleja.

Atendiendo al primer objetivo de esta tesis, se ha definido una metodología aplicada al diseño de componentes para capturar, definir, formalizar y documentar la información de los procesos de fabricación que debería estar disponible en el diseño para diseñar para fabricar (DFM).

Valorando la amplia cantidad de información de los procesos para DFM, que se puede obtener de los expertos en procesos de fabricación y aquella que está disponible en la literatura especializada, además de la complejidad asociada al proceso de diseño, se ha establecido el primer requisito para desarrollar dicha metodología. Este requisito ha sido limitar la información de los procesos para DFM a aquella que afecta a las soluciones de diseño que se definen para cumplir con la función del producto. Para ello se ha tomado la teoría de Diseño Axiomático (Suh, 2001). Esta teoría declara la relación explícita del dominio del proceso con el dominio funcional a través del dominio físico, y manifiesta que la información de diseño incluida en el dominio físico y en el dominio de proceso tiene

que limitarse a aquella que es relevante para satisfacer los requerimientos funcionales del producto.

La dependencia de la información necesaria de los procesos para DFM con la información disponible de diseño, en la que se incluye los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño, y la práctica habitual por parte del diseñador de no documentar toda la información de diseño de forma explícita (Chakrabarti et al., 2004) ha generado el segundo requisito de la metodología: la definición y formalización de dicha información de diseño para identificar la información necesaria de los procesos para DFM.

La necesidad de facilitar la búsqueda y la disponibilidad de la información de procesos para tomar decisiones en el diseño ha establecido el tercer requisito de la metodología: la definición, formalización y documentación de la información necesaria de los procesos para DFM.

Tras el desarrollo de la metodología se puede concluir lo siguiente:

- La información de los procesos que debe estar disponible para DFM tiene que limitarse a aquella que es realmente necesaria para cada fase de diseño. Proporcionar un exceso de información al diseñador puede dificultar aun más la toma de decisiones en el proceso de diseño e incluso puede llegar a ser confusa.
- La información disponible de diseño es la información de partida para el desarrollo de procedimientos sistemáticos que permiten capturar la información necesaria de los procesos para DFM. En este sentido, la definición y formalización de la información de diseño facilita el desarrollo de investigaciones para mejorar la integración de diseño y fabricación.
- La definición y formalización de la información de los procesos de fabricación es necesaria para agilizar el proceso de tomar decisiones para DFM. De este modo se disminuye notablemente la experiencia requerida para buscar y seleccionar aquella información de los procesos que puede ser relevante para cada fase de diseño.

La metodología propuesta ha posibilitado plantear un prototipo de modelo de información que permitiría desarrollar una herramienta para asistir al diseñador en la captura, definición y formalización de la información necesaria de los procesos para DFM en el diseño de componentes; el segundo objetivo propuesto en esta tesis. Como consecuencia del resultado de la metodología este prototipo de modelo también cumple con otro propósito: que la herramienta que de él se derivaría también pudiera asistir al diseñador en la definición y formalización de la información de diseño, específicamente requerimientos funcionales (FRs) y parámetros de diseño (DPs). Las conclusiones de dicho prototipo de modelo de información son:

- Tal y como se propone en las metodologías de modelado de información, la estructuración y formalización de la información es un requerimiento previo y necesario para el desarrollo de dicho modelo.

- El desarrollo de modelos de información que permitan representar conocimiento es esencial para que las aplicaciones informáticas derivadas puedan asistir al diseñador de forma efectiva.

La metodología se ha validado mediante un caso real y se ha aplicado a tres procesos de fabricación. Este caso es la biela de un MCIA de vehículos de automóvil y los procesos de fabricación han sido: la forja en caliente con matriz cerrada, el proceso de compactación y sinterizado de polvo de metal, y la forja de polvo de metal. El hecho de validarla con un diseño real permite tener un mejor conocimiento de las implicaciones que la aplicación de dicha metodología tendría para su uso industrial.. Las conclusiones que se generan de ello son las siguientes:

- Desde el punto de vista de su aplicación hay que distinguir dos fases de trabajo. La primera es la fase de creación y desarrollo del sistema de DFM de apoyo al diseño, en la cual se captura, define y formaliza información y conocimiento del entorno real. Para esta primera fase se debe aplicar la metodología propuesta. La segunda es la fase de utilización del sistema de DFM. En esta segunda fase el sistema guía al usuario en la definición y formalización de información y de conocimiento del entorno real y además le propone información poblada durante la fase de desarrollo. En esta segunda fase se deben considerar los principios de la metodología propuesta.
- La complejidad asociada al proceso de diseño, la amplia cantidad de información relacionada con cada proceso de fabricación y la experiencia requerida para identificar la información de DFM evidencian la relevancia de disponer de procedimientos sistemáticos que asistan para capturar y formalizar la información necesaria de los procesos de fabricación para DFM.
- Los resultados obtenidos de aplicar la metodología a un caso real demuestran que en el proceso de diseño se tiene que definir y gestionar una amplia cantidad de información, y que esta información aumenta notablemente cuando se introduce la información que puede ser relevante para la fabricación del mismo. De ello se deriva que disponer de sistemas informáticos para almacenar y gestionar dicha información es fundamental.
- Los procedimientos sistemáticos para definir y formalizar la información de diseño y de fabricación, como los que se proponen en esta tesis, facilitan su definición explícita y documentación. A pesar de ello, la definición explícita de la información, tanto de diseño como de fabricación, no es en ningún momento fácil de conseguir.
- En la fase de desarrollo y de representación del sistema se requiere de definir la información forma explícita, tanto de diseño como de fabricación. Mientras que en la segunda fase, el sistema ayuda al diseñador a hacer explícita dicha información.
- Los resultados obtenidos de aplicar la metodología a los tres procesos de fabricación estudiados en esta tesis, revelan que al aplicar la metodología a procesos semejantes la información de DFM es bastante similar, pues generalmente cambian los valores y las dependencias de los mismos. Aunque es cierto que existen algunas propiedades específicas, como la anisotropía para el proceso de forja en matriz cerrada y la

porosidad para el proceso de compactación y sinterizado de polvo de metal, que pueden ser claves en ciertas decisiones de diseño.

- La aplicación de los resultados de la metodología justifican que tener disponible la información necesaria de los procesos para DFM facilita notablemente la consideración de la fabricación en el diseño. Con lo cual se asegura que las decisiones que se toman en el diseño sean coherentes con el proceso de fabricación, evitando así errores posteriores que incrementan el coste y el tiempo de desarrollo del producto.
- La captura de conocimiento y de información real es un aspecto fundamental para el desarrollo de sistemas que sean capaces de asistir al diseñador de forma efectiva. Aunque ello requiere de disponer de modelos que estructuran esta información expresada en lenguaje natural y este conocimiento asociado a la experiencia.

5.2. Contribuciones de la tesis

Los aspectos novedosos de esta tesis, en relación con otros trabajos realizados en la integración de diseño y de fabricación, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La utilización de una metodología de diseño, concretamente la teoría de Diseño Axiomático, como base para formalizar la aplicación del concepto de DFM. Pues esta teoría ha sido la base teórica para:
 - Acotar la información de diseño a los requerimientos funcionales (FRs) y a los parámetros de diseño (DPs).
 - Fundamentar la correspondencia entre la información de diseño y la información de los procesos, a través del vínculo del dominio funcional, del dominio físico y del dominio de proceso.
 - Limitar la información de los procesos para DFM a aquella que afecta a los parámetros de diseño que satisfacen los requerimientos funcionales.

Por ello las principales aportaciones de esta tesis se incluyen en la teoría de Diseño Axiomático y en las técnicas de DFM.

- El desarrollo de procedimientos sistemáticos para definir y formalizar la información de diseño de componentes. Los requerimientos funcionales (FRs) en el dominio funcional y los parámetros de diseño (DPs) en el dominio físico. Estos procedimientos, basados en la estructura y la formalización de dicha información, pueden asistir al diseñador en la definición, formalización y documentación de la misma.
- La propuesta de un procedimiento de correspondencia entre el dominio físico y el dominio de proceso para capturar la información de los procesos necesaria para DFM.
- El desarrollo de un procedimiento sistemático para definir y formalizar las propiedades de los procesos (PPs) y los defectos de fabricación (Dfs) que pueden

afectar para obtener los parámetros de diseño (DPs), para el diseño de componentes y los procesos de fabricación de forma.

- La diferenciación en el dominio de proceso entre la información de DFM, que incluye PPs y Dfs, y las variables de ejecución del proceso (EVs).
- El prototipo de modelo de información que se ha planteado en esta tesis para el futuro desarrollo de una aplicación para asistir al diseñador en dos direcciones: a) en la definición y formalización de la información de diseño (funciones y parámetros de diseño), y b) en la capturar y formalizar la información necesaria de los procesos que debería estar disponible para DFM en dicho diseño. Esta aportación también se puede considerar relevante en el desarrollo de herramientas informáticas para asistir el diseño.

Desde un punto de vista general, todas las aportaciones aquí citadas se pueden incluir en el dominio de aplicación en el que se ha desarrollado la tesis, la integración de la Ingeniería de Diseño y la Ingeniería de Fabricación.

Las principales ventajas que se pueden obtener en la tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Impulsar la definición y formalización de la información del proceso de diseño y la información de fabricación para DFM.
- Facilitar la integración del proceso de fabricación en la fase de diseño.
- Favorecer el desarrollo de herramientas basadas en la captura y formalización de conocimiento para asistir al proceso de diseño

5.3. Desarrollos futuros

Considerando los objetivos propuestos, los resultados obtenidos, las conclusiones derivadas de los mismos, y tras la exposición de las aportaciones de este trabajo en la integración de diseño y de fabricación, se presentan los desarrollos futuros que se plantean dentro de esta misma línea de investigación, la integración de diseño y de fabricación.

- Aplicar la metodología a más procesos de fabricación, y a su vez de diferentes tecnologías para incrementar la base de conocimiento de DFM. Por ejemplo, procesos de fundición o de arranque de viruta.
- Completar el modelo de información propuesto para el desarrollo de una aplicación de DFM prototipo. Lo cual conllevaría a analizar como esta aplicación debería integrarse en un sistema de diseño asistido por ordenador, como un sistema CAD, donde poder hacer la definición geométrica del componente que se desea diseñar.
- Analizar como se podría reutilizar la información obtenida de aplicar la metodología en el diseño de nuevos componentes. Incluyendo la información de diseño y la información de los procesos de fabricación para DFM.

- Analizar como se podría integrar en un sistema para DFM la definición de requerimientos no funcionales y requerimientos cualitativos. Como por ejemplo, requerimientos relacionados con el aspecto de los productos.
- Manteniendo los aspectos generales recomendados en esta tesis, se podrían definir y formalizar las variables de ejecución del proceso (EVs). Así como también, la relación que estas pueden tener con los parámetros de diseño (DPs) que son necesarios para satisfacer los requerimientos funcionales (FRs) y extender la relación de dichas variables con los defectos de fabricación (Dfs).
- Incorporar aspectos relacionados con la estimación de costes de fabricación en el sistema de DFM propuesto.

Capítulo 6. Bibliografía

- Aca, J., Molina, A., Ferrer, I. y Albertí, M. (2004). "Experience in Product, Process and Facility Development: A Case of Study". *Lecture Notes in Computer Science*, 3190, 69-78.
- Afzal, A. y Fatemi, A. (2003). A Comparative Study of Fatigue Behavior and Life Predictions of Forged Steel and PM Connecting Rods. *Society of Automotive Engineers*, SAE 2004-01-1529, 1-12.
- Akao, Y. (1990). *Quality function deployment: integrating customer requirements into product design*. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press.
- Alexander, I. y Stevens, R. (2002). *Writing better requirements*. London, Great Britain: Addison-Wesley.
- ARROW precision. "<http://www.arrowprecision.co.uk/titanium.html>" (último acceso Noviembre, 2006).
- Ashby, M.F., Brechet, Y.J.M., Cebon, D. y Salvo, L. (2004). "Selection strategies for materials and processes". *Materials & Design*, 25 (1), 51-67.
- BME Aluminum Rods. "<http://bmeltd.com/rods.htm>" (último acceso Noviembre, 2006).
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W. (2002). *Product design for manufacture and assembly*. New York: Marcel Dekker.

- Bralla, J.G. (1999). *Design for manufacturability handbook*. New York, London: McGraw-Hill.
- Brechet, Y., Bassetti, D., Landru, D. y Salvo, L. (2001). "Challenges in materials and process selection". *Progress in Materials Science*, 46 (3-4), 407-428.
- Brown, S.M. y Wright, P.K. (1998). "A progress report on the manufacturing analysis service, an Internet-based reference tool". *Journal of Manufacturing Systems*, 17 (5), 389-398.
- Chakrabarti, A., Morgenstern, S. y Knaab, H. (2004). "Identification and Application of Requirements and Their Impact on the Design Process: A Protocol Study". *Research in Engineering Design*, 15 (1), 22-39.
- Chakrabarti, A. y Bligh, T.P. (2001). "A scheme for functional reasoning in conceptual design". *Design Studies*, 22 (6), 493-517.
- Chen, Y., Gupta, S.K. y Feng, S. (2000). A web-based process/material advisory system. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Proceedings of IMECE00*. Orlando, Florida, 1-8.
- Chernenkoff, R.A., Mocarski, S. y Yeager, D.A. (1995). Increased fatigue strength of powder forged connecting rods by optimised shot peening. *Society of Automotive Engineers- Journals and materials and manufacturing*, SAE-950384, 272-278.
- Ciurana, J., G.-Romeu, M.L., Ferrer, I. y Casadesús, M. (aceptado 10/2007). "A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, pendiente de publicación
- Ciurana, J., Ferrer, I. y Gao, J.X. (2006). "Activity model and computer aided system for defining sheet metal process planning". *Journal of Materials Processing Technology*, 173 (2), 213-222.
- Committee under ASM direction (1998). *Metals handbook-ASM Handbook: Powder Metal. Technologies and applications*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Committee under ASM direction (1997). *Metals handbook-ASM Handbook: Materials Selection and Design*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Committee under ASM direction (1988). *Metals handbook-ASM Handbook: Forming and Forging*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- Corus. "www.corus-automotive.com" (último acceso Noviembre, 2006).

- Cristiano, J.J., Liker, J.K. y White, C.C. (2000). "Customer-driven product development through quality function deployment in the u.s. and japan". *Journal of Product Innovation Management*, 17 (4), 286-308.
- Cross, N. (1994). *Engineering design methods: strategies for product design*. Chichester ; New York: John Wiley & Sons.
- Darwish, S.M. y El-Tamimi, A.M. (1996). "The selection of the casting process using an expert system". *Computers in Industry*, 30 (2), 77-86.
- Deng, Y.M. (2002). "Function and behavior representation in conceptual mechanical design". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 16 (5), 343-362.
- Dieter, G.E. (2000). *Engineering design: a materials and processing approach*. Boston: McGraw-Hill College.
- Engineersedge. *Manufacturing Process Engineering*. <http://www.engineersedge.com/> (último acceso Noviembre, 2006).
- Er, A. y Dias, R. (2000). "A rule-based expert system approach to process selection for cast components". *Knowledge-Based Systems*, 13 (4), 225-234.
- Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (2000). The development and use of a software tool for selecting manufacturing processes at the early stages of design. *2000 Society for Design and Process Science (SDPS)*, 4, (2), 27-43.
- Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (1998). Cost-based ranking for manufacturing process selection. *Proceedings of the Second International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME '98)*, Compiègne, France, 4, 1001-1008.
- Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (2003). "Cost estimates to guide pre-selection of processes". *Materials & Design*, 24 (8), 605-616.
- Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (2000). "CES Selector (Cambridge Engineering Selector)". 4.5v
- Farias, P., Aca, J., Molina, A., Maury, H. y Riba, C. (2006). Evolución de los modelos del proceso de diseño. Dentro de C. Riba y A. Molina, *Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora*. Barcelona: Edicions UPC.
- Feng, S. y Zhang, Y. (1999). Conceptual Process Planning - a definition and functional decomposition. *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Manufacturing Science and Engineering*, 10, 97-106.

- Feng, S.C. y Song, E.Y. (2000). Information Modeling of Conceptual Process Planning Integrated with Conceptual Design. *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC2000)*, Baltimore, Maryland, DETC2000/DFM-14009, 1-9.
- Ferrer, I., Rios, J. y Ciurana, J. (2006a). Integration of Manufacturing Process Knowledge in Part Design Phases. *Proceedings of Advances in Materials Processing Technologies (AMPT)*, Las Vegas, EEUU, Julio, 1, 25-29.
- Ferrer, I., Ríos, J. y Ciurana, J. (2006b). Flujo de información en el proceso de diseño. Dentro de C. Riba y A. Molina, *Ingeniería Concurrente. Una metodología integradora*. Barcelona: Edicions UPC.
- Ferrer, I., Rios, J. y Ciurana, J. (2004). Selección de procesos de fabricación y análisis de fabricabilidad en el diseño preliminar. *Anuales del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, León, España, diciembre, 1, 173-180.
- Forging Industry Association. "<http://www.forging.org>" (último acceso Noviembre, 2006).
- Froes, F.H., Friedrich, H., Kiese, J. y Bergoint, D. (2004). "Titanium in the Family Automobile: The Cost Challenge". *JOM: The Member Journal of TMS*, 56 (2), 40-44.
- Giachetti, R. (1997). "A Decision Support Systems for Material and Manufacturing Process Selection". *Journal of Intelligent Manufacturing*, January, 1-16.
- Giacosa, D. (1988). *Motores endotérmicos*. Barcelona: Omega.
- Gonzalez, F. (2001) *Propuesta funcional y estructuración de información y conocimientos para la planificación de procesos asistida por computador*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- Groover, M.P. (2002). *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*. New York: Wiley.
- Gupta, S., Das, D., Regli, W.C. y Nau, D.S. (1995). "Automated manufacturability analysis: A survey". *Research in Engineering Design*, 9 (3), 168-190.
- Gupta, S.K. y Chen, Y. (2003). "A System for Generating Process and Material Selection Advice During Embodiment Design of Mechanical Components". *Journal of Manufacturing Systems*, 22 (1), 28-45.
- Herrman, J. y Cooper, J., et al. (2004). New directions in design for manufacturing. *ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information un Engineering Conference*, Salt Lake City, Utah, USA, DETC2004-57770, 1-9.

- Hoffmann, G., Geiman, T., Marra, M. y Williams, R. (2002). Fracture Splitting of Powder-Forged Connecting Rods. *Society of Automotive Engineers*, SAE 2002-01-0609, 308-316.
- Howarth, M.H. (1966). *The design of high speed diesel engines*. London: Constable.
- Hubka, V. y Eder, W.E. (1996). *Design science: Introduction to needs, scope and organization of engineering design knowledge*. Berlin; New York: Springer.
- Hunter, R., Rios, J., Perez, J.M. y Vizan, A. (2006). "A functional approach for the formalization of the fixture design process". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (6), 683-697.
- Hunter, R., Vizan, A., Perez, J. y Rios, J. (2005). "Knowledge model as an integral way to reuse the knowledge for fixture design process". *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165,1510-1518.
- Iliá, E., O'Neill, M. y Tutton, T. (2002). Higher Fatigue Strength Materials for Powder-Metal- Forged Connecting Rods. *Society of Automotive Engineers*, SAE 2002-01-0611, 317-323.
- Ishii, K., Yu, J.C. y Krizan, S. (1993). "Computer-aided Design for Manufacturing Process Selection". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 4, 199-208.
- Ishii, K., Krizan, S., Lee, C.H. y Miller, R.A. (1991). HyperQ/Process: An Expert System for Manufacturing Process Selection. *Proceedings of the 6th international conference on Artificial Intelligence in Engineering*, Oxford, U.K, 405-422.
- ISO- STEP Part 224 (2001). *Mechanical product definition for process planning using from features*. ISO 10303-224: 2001:
- Kalpakjian, S. (2003). *Manufacturing processes for engineering materials*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S.R. (2001). *Manufacturing engineering and technology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Kuo, T., Huang, S.H. y Zhang, H. (2001). "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives". *Computers & Industrial Engineering*, 41 (3), 241-260.
- Landru, D., Bréchet, Y. y Asbhy, M.F. (2002a). "Finding Applications for Materials". *Advanced Engineering Materials*, 4 (6), 343-349.

- Landru, D., Bréchet, Y. y Salvo, L. (2002b). "Materials and Process Selection: An Integrated Approach". *Advanced Engineering Materials*, 4 (6), 357-362.
- Larman, C. (2004). *UML y patrones : una introducción al análisis y diseño orientado a objetos y al proceso unificado*. Madrid: Pearson Educación.
- LeBacq, C., Brechet, Y., Shercliff, H.R., Jeggy, T. y Salvo, L. (2002). "Selection of joining methods in mechanical design". *Materials & Design*, 23 (4), 405-416.
- Lenau, T. (2002). "Material and Process Selection Using Product Examples". *Advanced Engineering Materials*, 4 (6), 351-355.
- Lovatt, A.M. (1998) *Process selection in engineering design*. Tesis doctoral. Cambridge
- Lovatt, A.M., Bassetti, D., Shercliff, H.R. y Brechet, Y. (1999). "Process and alloy selection for aluminium casting". *International Journal of Cast Metals Research*, 12 (4), 211-225.
- Lovatt, A.M. y Shercliff, H.R. (1998a). "Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection". *Materials and Design*, 19 (5-6), 205-215.
- Lovatt, A.M. y Shercliff, H.R. (1998b). "Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures". *Materials and Design*, 19 (5-6), 217-230.
- Maloney, L., Ishii, K. y Miller, R.A. (1989). Compatibility-based Selection of Forging Machines and Processes. *Proceedings ASME WAM: Concurrent Product and Process Design*, San Francisco, diciembre, 161-167.
- Marra, M.P., Compton, W.A. y Skurka, J.C. (1992). Fatigue testing of a powder forged connecting rod. *Society of Automotive Engineers*, SAE 920218, (section 5), 150-158.
- NDP-solutions. *Design for Manufacturability Guidelines*. "<http://www.npd-solutions.com/designguidelines.html>" (último acceso Noviembre, 2006).
- Norton, R.L. (2005). *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.
- O' Driscoll, M. (2002). "Design for manufacture". *Journal of Materials Processing Technology*, 122 (2-3), 318-321.
- Oliver Racing Parts. "www.oliver-rods.com" (último acceso Noviembre, 2006).
- Oosterman, B.J. (2001) *Improving product development projects by matching product architecture and organization*. Tesis doctoral. University of Groningen, The Netherlands

- Otto, K.N. y Wood, K.L. (2001). *Product design: techniques in reverse engineering and new product development*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Paek, S.Y., Ryou, H.S., Oh, J.S. y Choo, K.M. (1997). Application of high performance powder metal connecting rod in V6 Engine. *Society of Automotive Engineers*, SAE-970427, (section 5), 438-445.
- Pahl, G., Beitz, W., Wallace, K., Blessing, L. y Bauert, F. (1996). *Engineering design: a systematic approach*. London: Springer.
- Perez, R., Ciurana, J. y Riba, C. (2005). "The characterization and specification of functional requirements and geometric tolerances in design". *Journal of Engineering Design*, 17, 311-324.
- Pugh, S. (1990). *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley.
- Purday, H.F.P. (1962). *Diesel engine designing*. London.
- Repgen, B. (1998). Optimized connecting rod to enable higher engine performance and cost reduction. *Society of Automotive Engineers*, SAE-980882, 647-651.
- Riba, C. (2002). *Disseny de màquines V. Metodologia*. Barcelona: Edicions UPC.
- Rios, J., Roy, R. y Sackett, P. (2006). "Requirements engineering and management for manufacturing". *SME Blue books series*, 1-25.
- Roozenburg, N.F.M. (1995). *Product design : fundamentals and methods*. Chichester: Wiley.
- Rumbaugh, J., Jacobson, I. y Booch, G. (2000). *El lenguaje unificado de modelado, manual de referencia*. Madrid: Pearson Educaciãon.
- Sala, G. (2002). "Technology-driven design of MMC squeeze cast connecting-rods". *Science and Technology of Advanced Materials*, 3 (1), 45-57.
- Salimon, A., Bréchet, Y., Ashby, M.F. y Greer, A.L. (2004). "Selection of Applications for a Material". *Advanced Engineering Materials*, 6 (4), 249-265.
- Shenoy, P.S. (2004) *Dynamic load analysis and optimization of connecting rod* .Tesis doctoral. Universidad de Toledo, Ohio
- Shercliff, H.R. y Lovatt, A.M. (2001). "Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling". *Progress in Materials Science*, 46 (3-4), 429-459.
- Shigley, J.E. y Mischke, C.R. (1998). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: McGraw-Hill.

- Smith, C.S., Wright, P.K. y Sequin, C. (2003). "The Manufacturing Advisory Service: web-based process and material selection". *International Journal Computer Integrated Manufacturing*, 16 (6), 373–381.
- Sorli, M. y Ruiz, J. (1994). *QFD. Una herramienta de futuro*. Bilbao, España: LABEIN Centro de Investigación Tecnológica.
- Suh, N.P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications*. New York, Oxford: Oxford University Press.
- Suh, N.P. (1990). *The principles of design*. New York: OUP.
- Swift, K.G. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- H. Takeda, M. Yoshioka y Y. Shimomura. *Analysis of design processes by function, behavior and structure*. "<http://www-kasm.nii.ac.jp/papers/takeda/95/DPW-paper.pdf>" (último acceso Noviembre, 2005).
- Taylor, C.F. (1960). *The internal-combustion engine in theory and practice*. Cambridge, Mass; London: MIT Press ; New York; Wiley.
- Ullman, D.G. (1992). *The mechanical design process*. New York, London: McGraw-Hill.
- Van Wie, Mike J., Rajan, P., Campbell, M.I., Syone, R.B. y Wood, K.L. (2003). Representing product architecture. *Proceedings of Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, DETC2003/DTM-48668, 38-49.
- Vazquez, V. y Altan, T. (2000). "Die design for flashless forging of complex parts". *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (1), 81-89.
- Vila, C. (2000) *Estrategias de implantación de nueva tecnologías en el ámbito de Ingeniería Concurrente*. Tesis doctoral. Universitat Jaume I
- Willaert, S.S.A., de Graaf, R. y Minderhoud, S. (1998). "Collaborative engineering: A case study of Concurrent Engineering in a wider context". *Journal of Engineering and Technology Management*, 15, 87-109.
- Woon Cha, S. y Rak Moon, Y. (2000). Using axiomatic design for development of new concept design and manufacturing. *Proceedings on the First International Conference on Axiomatic Design*, Cambridge, ICAD-035, 83-86.
- Yang, K. y Zhang, H. (2000). A comparison of TRIZ and Axiomatic Design. *Proceedings on the First International Conference on Axiomatic Design*, Cambridge, ICAD-056, 235-243.

-
- Zha, X.F. (2005). "A web-based advisory system for process and material selection in concurrent product design for a manufacturing environment". *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 25 (3-4), 233–243.

ANEXOS

ANEXO I

**Documentos de formalización de la
información de la metodología**

DOMINIO FUNCIONAL

1. Matriz de formalización de un requerimiento funcional (FR)

FORMALIZACION DE UN FRs

Nivel predecesor de FRs	
Código requerimiento	
Descripción requerimiento	

<i>FUNCION</i>		
	<i>Acción (verbo)</i>	<i>Objeto (Flujo)</i>
Función		

<i>Tipo de Restricción</i>	Descripción de la restricción (Cs)	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Tolerancia</i>
Entrada				
Salida				
Entorno				
Diseño				

DOMINIO FISICO

2. Matriz de formalización de un parámetro de diseño (DP) y de las relaciones FR-DP

Requerimiento funcional		
Estructura física		
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	
	Unidades	
	Tolerancia	
Descripción		

Requerimiento funcional		
Estructura física		
Parámetro de diseño (DPs)	Propiedad de producto	
	Especificación	Tipo selección / Tipo boleano
	Valor	
Descripción		

4. Matriz de formalización de una propiedad de proceso (PP) y de las relaciones DP-PP

Propiedad de diseño (DP)		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	
	Especificación	Tipo numérica
	Valor	
	Unidades	
	Tolerancia	
	Dependencias	
Descripción		
Tipo de relación		

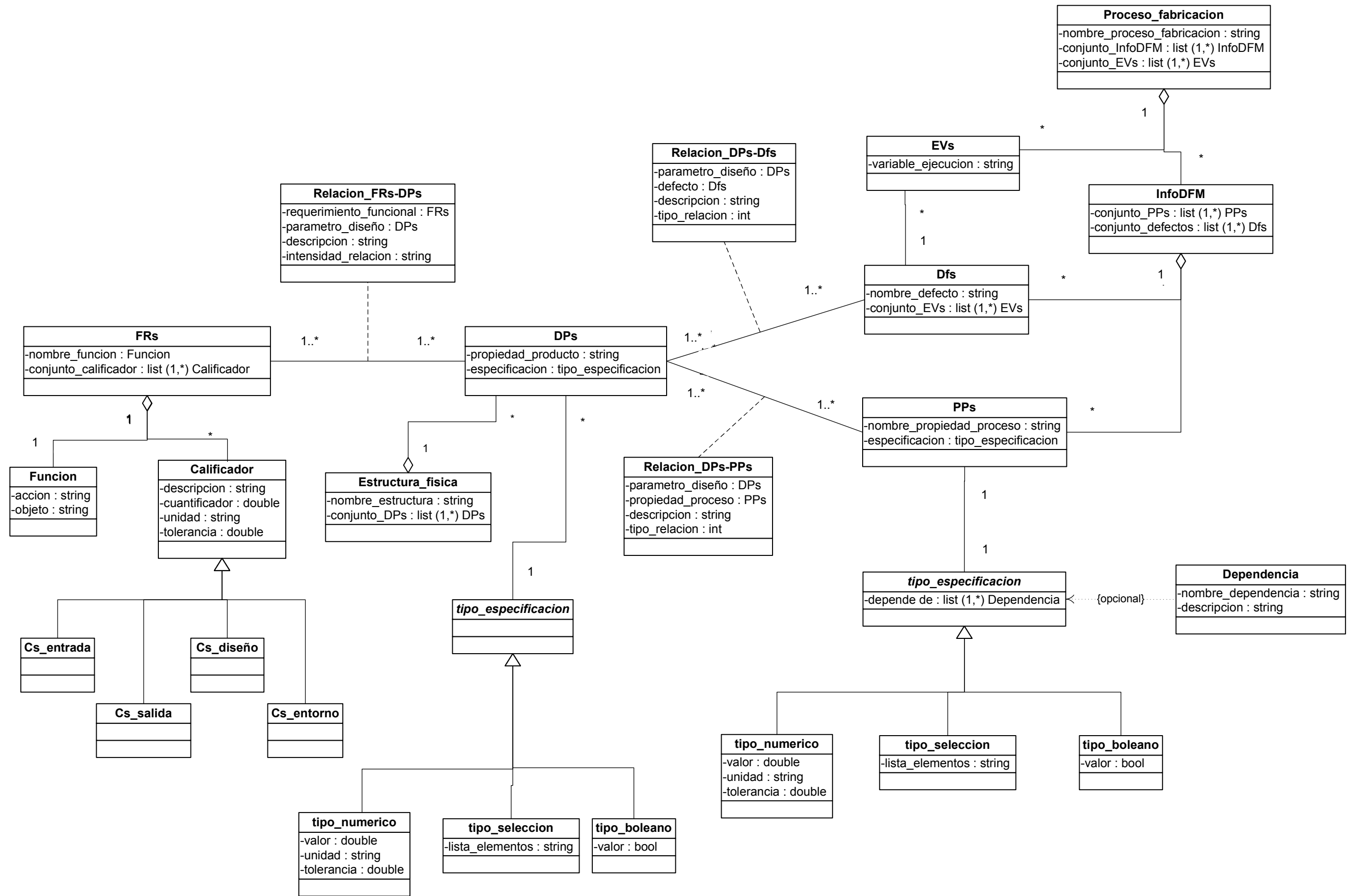
Propiedad de diseño (DP)		
Propiedad de proceso (PPs)	Nombre de la propiedad	
	Especificación	Tipo selección / Tipo boleano
	Valor	
	Lista de selección / Rango boelano	
	Dependencias	
Descripción		
Tipo de relación		

5. Matriz de formalización de un defecto de fabricación (Df) y de las relaciones DP-Df

Propiedad de diseño (DP)		
Defecto de fabricación	Nombre del defecto	
	Proceso de fabricación	
	Variables de ejecución (EVs)	
Descripción		
Tipo de relación		

ANEXO II

Prototipo del modelo de información



AUTOR: Inés Ferrer Real	REVISADO POR: José Ríos
PROYECTO: Tesis Doctoral	FECHA: 10/1/2007
TITULO: Prototipo de modelo de información	

ANEXO III

Plano de una biela de MCIA

