



Universitat de Girona

CONTRIBUCIÓN A LA SELECCIÓN DE CADENAS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN

Robert BLANCH FONT

Dipòsit legal: GI-602-2012

<http://hdl.handle.net/10803/79000>

ADVERTIMENT: L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

Contribución a la selección
de cadenas de procesos de
fabricación

por Robert Blanch Font

2011



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

Programa oficial de posgrado en Turismo, Derecho y Empresa

Doctorado en planificación de procesos productivos y de
fabricación

Contribución a la selección
de cadenas de procesos de
fabricación

por Robert Blanch Font

Dirigida por: Dra. Inés Ferrer Real

Dirigida por: Dra. Ma. Luisa Garcia-Romeu

2011

Memoria presentada para obtener el título de
Doctor por la Universitat de Girona

Als meus.

A veces sentimos que lo que hacemos es tan solo una gota en el mar,
pero el mar sería menos si le faltara una gota.

Madre Teresa de Calcuta

No te conformes con el qué, sino que logra saber el porqué y el cómo.

Robert S. Baden-Powell, BP

Agradecimientos

Después del largo camino transcurrido para realizar esta tesis, agradezco a compañeros y amigos en los cuales he encontrado la fuerza y los consejos para seguir.

Empezando por las directoras de tesis Dr. Inés Ferrer y Dr. María Luisa Garcia-Romeu por su guía y ayuda en el desarrollo de esta tesis cuando el camino se ha enturbiado y su confianza en que se llegaría a concluir. También agradezco al Dr. Joaquim de Ciurana la oportunidad de trabajar en el grupo de investigación del producto, proceso y producción (GREP) así mismo por la ayuda ofrecida al arrancar esta aventura y a todos los miembros del grupo de investigación, con los que he compartido el día a día, les agradezco el ambiente creado, los momentos lúdico-festivos y la ayuda prestada.

Agradezco a la Universidad de Girona la concesión de la beca doctoral y de los recursos para realizar esta tesis. Así también National Institute of Standard and Technology (NIST) y en especial al Dr. Feng Shaw por la oportunidad de realizar una estada de investigación en sus instalaciones en Gaithersburg (EE.UU.) con las que amplié mis conocimientos.

También agradezco a todos los amigos que con sus consejos, su ayuda en las encrucijadas y en los momentos vividos en las noches de acampada con un vaso de leche caliente con cola-cao me han permitido desconectar en las curvas y de afrontar con más entusiasmo las rectas del camino.

Concluyo estos agradecimientos, con un fuerte abrazo a mi familia por su apoyo recibido a lo largo de todos mis años de estudio y a Loreto porque siempre ha creado un sueño a mí alrededor tanto en las cortas distancias como en las grandes distancias no ha dejado que nada nos separe.

Índice

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	Descripción del dominio de aplicación de la tesis	1
1.2	Motivación de la tesis	6
1.3	Objetivos	8
1.4	Plan de desarrollo.....	9
1.5	Medios utilizados.....	10
1.6	Contenido de la tesis.....	10
Capítulo 2	Estado del arte	13
2.1	Selección de procesos de fabricación	14
2.1.1	Métodos para la selección de procesos de fabricación	15
2.1.2	Modelado de la información para la selección de procesos de fabricación	19
2.1.2.1	Atributos numéricos/ cuantitativos.....	21
2.1.2.2	Atributos cualitativos.....	23
2.1.2.3	Atributo material	24
2.1.2.4	Atributo forma	25
2.1.2.5	Clasificación de los procesos de fabricación.....	29
2.1.3	Herramientas para seleccionar procesos de fabricación.....	29
2.2	Selección de cadena de procesos de fabricación	31
2.3	Planificación del proceso de fabricación.....	34
2.4	Sistemas CAD y la integración con la selección de procesos	35

2.4.1 Reconocimiento de la información geométrica en los sistemas CAD	36
2.4.1.1 Reconocimiento de características geométricas	36
2.4.1.2 Diseño por características	41
2.4.1.3 Identificación interactiva de características	42
2.4.2 Herramientas que asisten al proceso de diseño y la integración con los sistemas CAD	42
2.5 Diseño para la fabricación (DFM) y análisis de la fabricabilidad	44
2.6 Establecimiento del problema	45
Capítulo 3 Fundamentos y estrategia para la derivación de cadenas de procesos de fabricación.....	49
3.1 Fundamentos básicos del modelo.....	50
3.2 Descripción de modelo funcional	53
3.2.1 “Derivar de la cadena de procesos” (A-0)	54
3.2.1.1 “Analizar del producto” (A1)	57
3.2.1.2 “Analizar y selecciona los proceso de fabricación en el nivel 1” (A2)	59
3.2.1.3 “Analizar y seleccionar procesos de fabricación en el nivel n” (A3)	67
3.2.1.4 “Ver las cadenas de proceso de fabricación resultantes” (A4) .	71
3.3 Validación del modelo funcional propuesto.....	71
3.4 Resumen de la propuesta para el modelo funcional.....	81
Capítulo 4 Modelado del algoritmo de derivación.....	83
4.1 Diagrama de casos de uso	83
4.2 Diagrama de actividades	86
4.3 Diagrama de clases.....	88
4.4 Diagrama de secuencias.....	91
4.4.1 Análisis del producto.....	91
4.4.2 Algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación	92
4.4.2.1 Inicialización del algoritmo.....	93
4.4.2.2 Complementar las cadenas de procesos de fabricación	94

Capítulo 5 Descripción y validación de la aplicación	97
5.1 Descripción de la solución	97
5.1.1 Información de diseño	98
5.1.1.1 Descripción de la forma del modelo CAD	99
5.1.1.2 Descripción dimensional	103
5.1.1.3 Información adicional.....	107
5.1.1.4 Extracción de la información del modelo CAD	108
5.1.2 Información de los procesos de fabricación.....	112
5.1.3 Método de derivación de cadenas de procesos de fabricación.....	115
5.2 Validación de la aplicación	118
5.2.1 Caso de estudio 1: Émbolo de un sistema de vasos comunicantes	119
5.2.2 Caso de estudio 2: Pinza de un portabrocas	129
Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros	139
6.1 Conclusión.....	139
6.2 Contribuciones de la tesis	140
6.3 Trabajos futuros	141
Capítulo 7 Bibliografía	143
Apéndices.....	151
Apéndice A – El modelado IDEF.....	151
A.1 Modelo IDEFØ	152
A.2 Sintaxis y semántica	152
A.3 Diagrama IDEFØ.....	153
Apéndice B – Lenguaje Unificado de Modelado (UML).....	155
B.1 Los elementos de UML.....	155
B.2 Las relaciones de UML.....	157
B.3 Los diagramas de UML.....	157
Apéndice C – Planos de piezas i diagramas.....	160

Índice de figuras

Figura 1 – Interrelación del diseño con el resto del ciclo de vida, basada en: (Espinosa Escudero, María del Mar y Domínguez, 2007).	2
Figura 2 – Resumen de las principales metodologías de diseño, fuente: (Álvarez Cabrales et al., 2009).....	3
Figura 3 – Enlaces entre diseño y fabricación	4
Figura 4 – Varias alternativas de diseño según el proceso de fabricación, fuente: (Magrab, 1997).	5
Figura 5 – Esquema de las estrategias de selección.	16
Figura 6 – Contexto donde se desarrolla la búsqueda libre.....	17
Figura 7 – Desglose del atributo “grosor de corte” para contorneado en acero dulce, fuente: (Lovatt y Shercliff, 1998a).....	22
Figura 8 – Representación gráfica de la compatibilidad de un atributo, fuente: (Giachetti, 1998).....	23
Figura 9 – Efecto de correlación sobre la viabilidad de los rangos de atributos en la soldadura, fuente: (Lovatt y Shercliff, 1998a).	23
Figura 10 – Primeros niveles de la clasificación de materiales propuesta por Swift & Booker, fuente: (Swift y Booker, 2003).	25
Figura 11 – Formas genéricas resultantes después de combinar las superficies con las complejidades, fuente: (Feng, 2005).	26
Figura 12 – Jerarquía de geometrías genéricas propuesta por Gupta et al., fuente: (Gupta et al., 2003).....	27
Figura 13 – Jerarquía de características geométricas propuestas por Gupta et al., fuente: (Gupta et al., 2003).....	27

Figura 14 – Clasificación de forma de Swift & Booker, fuente: (Swift y Booker, 2003).....	28
Figura 15 – Ámbito de trabajo de las cadenas de procesos de fabricación.....	32
Figura 16 – Estructura general de una hoja de ruta y su detalle de una fase.	34
Figura 17 – Circulación de la información para un entorno de fabricación automática, fuente: (Senthil kumar et al., 1996).....	36
Figura 18 – Limitaciones del método basado en grafos, fuente: (Marchetta y Forradellas, 2010).	37
Figura 19 – Sub-grafos de diversas características geométricas fuente: (Senthil kumar et al., 1996).	38
Figura 20 – Ranura identificada pero no válida para su fabricación, fuente: (Han, 1996)	38
Figura 21 – Ejemplo de descomposición en envueltas exteriores convexas, fuente: (Gutiérrez Rubert, 2007).	39
Figura 22 – (a) resultado calculado por descomposición mediante envolventes convexas (b) forma de fabricación, fuente: (Han, 1996).	39
Figura 23 – Comportamiento del método Cell Decomposition, fuente: (Han, 1996).	40
Figura 24 – Comportamiento del método hint-based, fuente: (Han, 1996)..	41
Figura 25 – Contexto de desarrollo del método de derivación de cadenas de procesos de fabricación.....	50
Figura 26 – Ejemplo en forma gráfica de la regla de secuencia para el proceso de fabricación de ‘fresado’.	53
Figura 27 – Contexto del algoritmo (A-0).	55
Figura 28 – Primer nivel de la derivación de la cadena de procesos.	56
Figura 29 – Detalle de la actividad A1.	57
Figura 30 – Detalle de la actividad A2 – Analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel 1.	61
Figura 31 – Detalle de la actividad A21 – Seleccionar procesos de fabricación compatible con el material.	62
Figura 32 – Detalle de la actividad A23 – Comprobar atributos Opcionales y Características geométricas.	63
Figura 33 – Detalle de la actividad A24 – Evaluar la transformación del proceso de fabricación	65

Figura 34 – Distribución en el espacio de los valores de rugosidad	66
Figura 35 – Distribución en el espacio de los valores de producción	66
Figura 36 – Esquema de un espacio de dimensión 2 con el diseño y tres procesos seleccionados	67
Figura 37 – Detalle de la actividad A3 –Analizar y seleccionar proceso de fabricación en el nivel n.....	68
Figura 38 – Boceto CAD de la matriz de doblado.	72
Figura 39 – Diagrama de flujo de la actividad A2.....	74
Figura 40 – Evaluar la capacidad de transformación del proceso de fabricación forjado en caliente de matriz cerrada.....	76
Figura 41 – Diagrama de flujo de la actividad A3.....	78
Figura 42 – Evaluar la transformación del proceso de fabricación pulido.....	79
Figura 43 – Combinación de los resultados del caso de estudio con el contexto del algoritmo.....	80
Figura 44 – Resumen de las etapas de la propuesta.	81
Figura 45 – Casos de uso de la aplicación para la confección de las cadenas de procesos de fabricación.....	84
Figura 46 – Posibilidades de interactuar con Autodesk Inventor, fuente: (Lochan, 2008).	84
Figura 47 – Casos de uso detallado de la aplicación.....	85
Figura 48 – diagrama de actividades, desarrolla el flujo de ejecución de la aplicación.	87
Figura 49 – Diagrama de clases, completo.	88
Figura 50 – Visualización de las clases vinculadas con la clase Producto.....	89
Figura 51 – Visualización de las clases vinculadas con la clase Process	90
Figura 52 – Secuencia de mensajes para recopilar la información de diseño.	92
Figura 53 – Secuencia de mensajes para establecer el primer eslabón de la cadena.	93
Figura 54 – Secuencia de mensajes para establecer los sucesivos eslabones de la cadena.	94
Figura 55 – Formulario “ <i>Introducción de los datos de diseño</i> ”.	98
Figura 56 – Zona ‘Descripción de la forma del modelo CAD’.	99

Figura 57 – Modelo CAD segmentado en volúmenes.....	99
Figura 58 – Zona ‘Descripción dimensional’, volúmenes.	103
Figura 59 – Concavidad del radio de canto.	105
Figura 60 – Zona ‘Descripción dimensional’, características geométricas...	105
Figura 61 – Tipologías de agujeros.	106
Figura 62 – Ejemplo de ranuras, fuente: (International Organization for Standardization, 2000).	106
Figura 63 – Zona ‘Descripción dimensional’, rugosidad.	107
Figura 64 – Zona ‘información adicional’.	107
Figura 65 – Ejemplo de la extracción de datos dimensionales: con el método de extracción directa.	109
Figura 66 – Ejemplo de extracción de datos dimensionales: con el método de extracción indirecta.	111
Figura 67 – Formulario “ <i>Introducción de los datos de diseño</i> ”, datos introducidos.	111
Figura 68 – Formulario “ <i>Procesos de fabricación</i> ”.....	112
Figura 69 – Restricciones dimensionales de la característica ‘agujero’ para el proceso de ‘forjado en caliente de matriz cerrada’.....	114
Figura 70 – Restricciones dimensionales de la formas de revolución para el proceso de forjado en caliente de matriz cerrada.....	115
Figura 71 – Formulario “ <i>Resultados del algoritmo</i> ”.....	116
Figura 72 – Modelo CAD del émbolo, boceto.	119
Figura 73 – Modelo CAD dividido en volúmenes.	120
Figura 74 – Zona descripción de la forma, valores del ejemplo.....	120
Figura 75 – Zona ‘descripción dimensional’, inicial.....	121
Figura 76 – Método de extracción directa, características seleccionadas. ...	122
Figura 77 – Zona ‘descripción dimensional’, valores dimensionales.....	122
Figura 78 – Zona ‘datos extra’, valores del ejemplo.	123
Figura 79 – Sistema CAD, propiedades del boceto.	123
Figura 80 – Formulario “ <i>Introducción de los datos de diseño</i> ”, datos introducidos.	124

Figura 81 – Formulario “Resultados del algoritmo”, visualización cadenas.....	125
Figura 82 – Modelo CAD de la pinza de un portabrocas, boceto.....	129
Figura 83 – Modelo CAD dividido en volúmenes.	130
Figura 84 – Formulario “Introducción de los datos de diseño”, datos introducidos.....	131
Figura 85 – Método de extracción directa, características seleccionadas. ...	131
Figura 86 – Formulario “Resultados del algoritmo”, visualización cadenas.....	133
Figura 87 – Sintaxis de la caja, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).	152
Figura 88 – Posición de las flechas y su función, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).	152
Figura 89 – Estructura jerárquica de los diagramas IDEFØ, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).....	154
Figura 90 – Taxonomía de diagramas de UML, fuente: (Wikipedia, 3w)....	158

Índice de tablas y ecuaciones

Tabla 1 – Lista de los parámetros considerados para definir un procesos.	20
Tabla 2 – Lista de herramientas de selección con respecto a su relación con los sistemas CAD.....	43
Ecuación 1 criterio técnico.	65
Tabla 3 – Valores de los atributos de diseño para el caso de estudio.	73
Tabla 4 – Relaciones entre las caras de los volúmenes contiguos.....	100
Tabla 5 – Combinaciones de los ejes de los volúmenes contiguos.....	101
Tabla 6 – Atributos que formalizan los volúmenes.	104
Tabla 7 – Tabla con los datos dimensiones y codificación de color de los diferentes volúmenes.....	122
Tabla 8 – Tabla con el resto de atributos de diseño considerados.	123
Tabla 9 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 2.	126
Ecuación 2 aplicación del criterio técnico de distancia.	126
Ecuación 3 conversión a porcentaje.....	127
Tabla 10 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 3.	127
Tabla 11 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 1.	128
Tabla 12 – Tabla con los datos dimensiones y codificación de color de los diferentes volúmenes (N.D. = No Definido).....	132
Tabla 13 – Tabla con las características geométricas (agujeros) encontradas en el modelo.	132
Tabla 14 – Tabla con las características geométricas (ranuras) encontradas en el modelo.	132
Tabla 15 – Tabla con el resto de atributos de diseño considerados.	133

Tabla 16 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 3.	135
Tabla 17 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 2.	136
Tabla 18 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 1.	137
Tabla 19 – representación gráfica de los elementos estáticos, fuente:(Booch et al., 2005).	156
Tabla 20 – representación gráfica de los elementos de comportamiento, fuente: (Booch et al., 2005).....	156
Tabla 21 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).	156
Tabla 22 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).	157
Tabla 23 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).	157
Tabla 24 – resumen de los diagramas UML, fuente: (Hamilton y Miles, 2006; Blankenhorn, 2004).....	159

Tabla de términos inglés-castellano

<i>Termino en inglés</i>	<i>Termino en castellano</i>
Analyze & select manufacturing process level 1	Analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel 1
Analyze & select manufacturing process level n	Analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel n
Analyze the product	Analizar el producto
Analyze the shape	Analizar la forma
Assessment phase	Fase de graduación o ranking
Basic shape description rules	Reglas de descripción de las formas básicas
Basic shape select	Forma básica seleccionada
Boundary representations	Representación de frontera
Branch and bound	Técnica de ramificación y poda
CAD part sketch	Boceto CAD
Capabilities	Capacidades
Capture the dimensional values	Capturar el valor dimensional
Cell-based decomposition	Descomposición basada en celdas
Check Optional and Features attributes	Comprobar atributos Opcionales y características geométricas
Check Required attributes	Comprobar los atributos requeridos
Check unresolved design attributes	Comprobar atributos de diseño no resueltos
Constructive solid geometry	Geometría construida por sólidos
Convex hull decomposition	Descomposición mediante envolventes convexas
Derive the process chain	Derivar la cadena de procesos
Description of CAD part shape	Descripción de la forma del boceto

Design by features	Diseño por características
Design specification	Especificaciones de diseño
Draw up the attributes list	Elaborar las listas de atributos
Electroforming	Galvanoplastia'
Embodiment	Materialización
Establish the shapes similarity degree	Establecer el grado de similitud de la forma
Evaluate the manufacturing process transformation	Evaluar la transformación del proceso de fabricación
Feature-based parametric modeling	Técnica de modelado paramétrico basada en características
Features design list	Lista de características geométricas
Graph-based pattern matching	Reconocimiento por coincidencia de patrones en Grafos
Gross shape	Forma básicas
GT Code	Código GT
Hot closed die forging	Forjado en caliente de matriz cerrada
List of manufacturing process successors compatible with material	Lista de procesos de fabricación sucesores compatibles con el material
List of manufacturing processes compatible with material	Lista de procesos de fabricación compatible con el material
List of manufacturing processes satisfying required attributes	Lista de procesos de fabricación que satisfacen los atributos requeridos
Look for manufacturing processes successors (following process)	Buscar procesos de fabricación sucesores (proceso siguiente)
Machining	Mecanizado
Make the manufacturing process ranking	Hacer el ranking de los procesos de fabricación
Manufacturing process classification	Clasificación de los procesos de fabricación
Manufacturing process constrains	Restricciones de los procesos de fabricación
Manufacturing process data	Datos de procesos de fabricación
Manufacturing process description	Descripción de los procesos de fabricación
Manufacturing process information	Información de los procesos de fabricación

Manufacturing process pool	Conjunto de procesos de fabricación almacenados en la base de conocimiento
Manufacturing process ranking for level X	Clasificación de los procesos de fabricación para el nivel X
Manufacturing process selected	Proceso de fabricación seleccionado
Manufacturing process sequencing rules	Reglas de secuencia de los procesos de fabricación
Manufacturing processes transformation capabilities.	Capacidades de transformación de los procesos de fabricación
Optional design attributes list	Lista de atributos opcionales
Powder metallurgy	Pulvimetalurgia
Product design attribute	Atributos de diseño del producto
Product design data	Información de diseño del producto
Repeat all A3 until part of unresolved list is empty	Repetir toda la actividad A3 hasta que la parte no resuelta de la lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos este vacía
Required design attributes list	Lista de atributos requeridos
Resolved/unresolved design attributes list	Lista de atributos resueltos o no resueltos
Roll-forming	Embutición
Route sheet	Hoja de ruta
Screening phase	Fase de discriminación
Search engine	Motor de búsqueda
Select manufacturing process compatible with the material	Seleccionar procesos de fabricación compatible con el material
Shape classification	Jerarquía de formas
Shaping processes	Procesos que dan forma
Shot-peening of surfaces	Granallado de la superficie
Sockets	Conectores
Viable manufacturing process list	Lista de procesos de fabricación viables
Viable manufacturing processes chain	Cadena de procesos de fabricación viable

View final manufacturing process chain	Ver las cadena de procesos de fabricación resultantes
Volumetric decomposition	Reconocimiento mediante descomposición en volúmenes

Capítulo 1 Introducción

En el presente capítulo se expone el dominio de aplicación en el que se encuadra esta tesis doctoral, los objetivos a alcanzar y los medios utilizados. Concluyendo con un resumen del contenido de la tesis.

1.1 Descripción del dominio de aplicación de la tesis

En el contexto actual de profundos cambios en los mercados industriales – debido a la globalización, deslocalización y la crisis económica– el principal desafío para las industrias es mantener la competitividad (Skander et al., 2008). Ejemplificándolo sobre una empresa, la viabilidad de ésta vendrá determinada por la cantidad de unidades de los productos que puede vender y el margen de beneficios que se puede obtener de cada unidad. Por lo tanto, el éxito de un diseño en términos económicos radica en garantizar la alta calidad del producto y reducir al mínimo los costes (SYNTHESIS Coalition, 3w). Además, otra consecuencia de la globalización es la internacionalización de las empresas, por lo que la competencia no se debe a los competidores de la zona sino que se amplía a todas las empresas del sector sin importar su ubicación.

Dentro de este contexto, la filosofía de ‘ingeniería concurrente’ ha ido ganando fuerza. En concreto la ingeniería concurrente (definida en la década de los 80 del siglo XX) plantea una reducción del tiempo de desarrollo de un producto a

través de la realización de tareas en paralelo, así como una integración-colaboración más estrecha de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. Lo que acaba incrementando la productividad y la calidad de dicho producto. Además la composición heterogénea y flexible de los equipos de diseño aporta tener en consideración las diferentes visiones del producto. Pues a nivel organizativo la ingeniería concurrente no demanda trabajar a nivel departamental, de forma aislada, sino en componer equipos con miembros de todos los departamentos, pudiendo llegar a incluir miembros de otras empresas como consecuencia de agregar la voz del cliente o colaboraciones con los proveedores (Capuz Rizo, 1999).

Retomando los principios de la ingeniería concurrente de ver el producto desde diferentes perspectivas, implica la necesidad que los equipos de diseño piensen en: clientes, fabricación, montaje, producción, distribución, ventas, uso/mantenimiento y reciclado entre otros. Estos diferentes aspectos planteados concuerdan con las fases del ciclo de vida de un producto y de entre ellas el diseño es una de las principales.

En la fase del diseño es en donde se crean, se transforman ideas y conceptos en productos definidos para satisfacer las necesidades del cliente y también aquellas que surgen de las distintas fases de ciclo de vida del producto (Ferrer et al., 2009; Pahl et al., 2007; Otto y Wood, 2001). La Figura 1 esquematiza la conexión del diseño con el resto de las fases, haciendo del diseño una pieza de contacto entre todas las áreas.

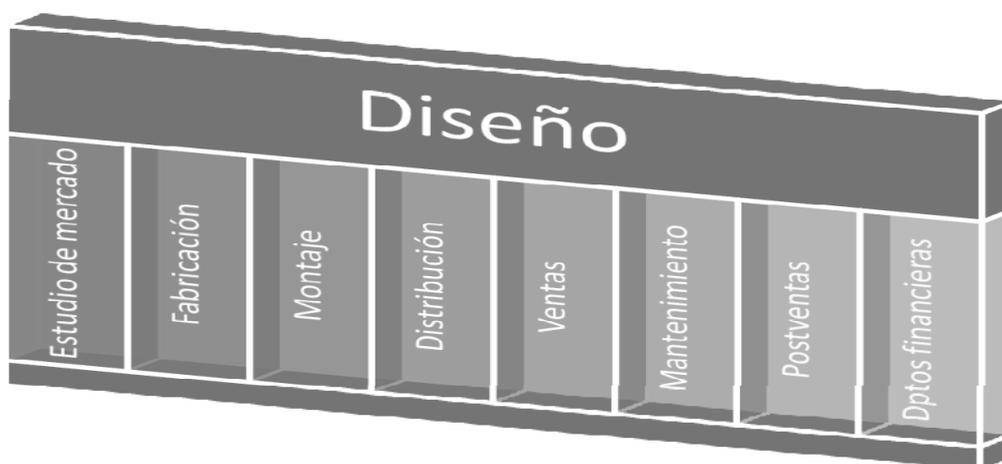


Figura 1 – Interrelación del diseño con el resto del ciclo de vida, basada en: (Espinosa Escudero, María del Mar y Domínguez, 2007).

El hecho que en el diseño se deba satisfacer tantas necesidades hace que los equipos de diseño se encuentren con una amplia gama de conocimientos a tener en consideración a la hora de desarrollar sus diseños. Desde la investigación se han desarrollado diversos modelos para guiar el proceso de diseño. La Figura 2 muestra un resumen de las etapas y actividades en las que se estructura el proceso de diseño

desde el punto de vista de diferentes autores de referencia, como son Pahl & Beitz, Dieter, Ullman entre otros (Álvarez Cabrales et al., 2009)

[Nadeu, 2002] (según Scaravetti, 2004)	Factibilidad	Definición de la idea global Ideas funcionales validadas	Definición, aprobación y validación de los conceptos	Concepción/ Desarrollo	Documentación Sistema Técnico
[Hubka, 1988] [Hubka, 2001]	Desempeño, exigencias funcionales y restricciones	Especificaciones técnicas, órganos, relaciones Distribución de componentes y estructuras	Esquemización (disposición, arquitectura) Distribución, formas globales, dimensionamiento parcial Disposición preliminar	Formas, dimensiones preliminares	Documentación Sistema Técnico
[Ullman, 2003]	Definición Específica Exigencias del cliente Especificaciones técnicas Objetivos	Diseño conceptual Generación de conceptos Evaluación de conceptos (factibilidad)	Configuración (distribución de componentes, ensamblaje) Generación de formas Interfaces entre componentes	Afinado Selección de materiales y procesos	Evaluación del producto Aprobación de la producción
[Dieter, 2000]	Identificación de la idea, definición del problema y las exigencias, propiedad industrial	Generación de conceptos Evaluación de conceptos	Arquitectura del producto, organización	Diseño Básico Diseño de configuración, restricciones especiales, selección preliminar de materiales	Formas, tolerancias, materiales, planos de fabricación y especificaciones
[Pahl, 1996] [Pahl, 2007]	Clarificación Req. Desempeño, exigencias funcionales y restricciones	Listado de requerimientos Diseño conceptual Selección de los principios tecnológicos fundamentales del sistema	Características estructurales, funcionamiento, energía, materiales y formas	Preparación, producción y ensamble Topología preliminar	Definición completa de los planos, nomenclaturas, etc.

Figura 2 – Resumen de las principales metodologías de diseño, fuente: (Álvarez Cabrales et al., 2009)

Toda las metodologías de diseño, entre otras las presentadas en la Figura 2, persiguen formalizar el procedimiento que abarca desde captar las especificaciones a resolver (ej. Ullmann, Dieter) o desde que se propone una idea (especificaciones definidas, ej. Pahl) hasta obtener la solución física (prototipo y/o planos del producto). Todas ellas se dividen en diversas fases o etapas y en cada una de las etapas se tienen asignada un conjunto de actividades a realizar. Se observa que en todas las metodologías se incluyen actividades de análisis, síntesis y evaluación con la finalidad de ir reduciendo el conjunto de soluciones hasta alcanzar el diseño detallado para ser fabricado (Ferrer et al., 2009).

Si analizamos donde se unen estas metodologías de diseño con la fabricación se pueden localizar diversos puntos de conexión. La Figura 3 establece estas conexiones entre las etapas de diseño propuestas por Pahl y Beitz (Pahl et al., 2007), graficadas en la parte superior y las etapas de la fabricación, reflejadas en la parte inferior de la figura.

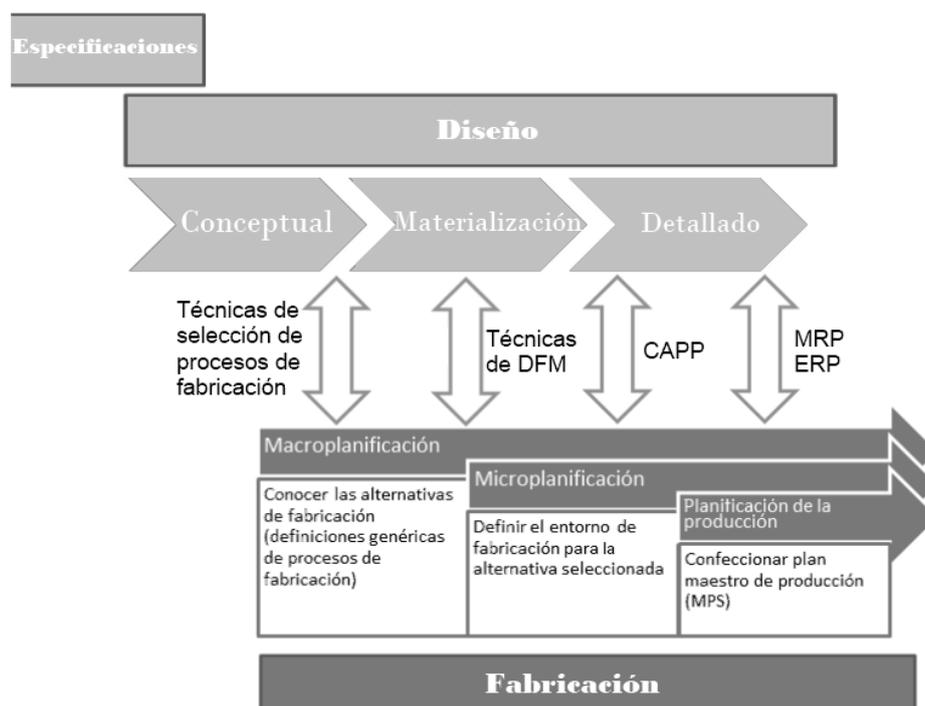


Figura 3 – Enlaces entre diseño y fabricación

La fase de fabricación compagina y define cómo usar los recursos para obtener el producto diseñado. Dentro de la fabricación hay una primera etapa de *macroplanificación*, en donde se establecen que procesos de fabricación se utilizarán para fabricar el producto, así como también el orden de los mismos. En la segunda etapa, que se corresponde con la *microplanificación o planificación de procesos* (más operativa) es en donde se definen las etapas y entorno de trabajo de cada proceso seleccionado en la fase anterior; por ejemplo: máquinas, herramientas, utillajes, variables, etc. (Gutiérrez Rubert, 2007). La fabricación, como se muestra en la Figura 3, concluye con la *planificación de la producción* que distribuye sobre un calendario las tareas planificadas en las etapas anteriores, y programadas y lanzadas en ella, con el fin último de satisfacer la previsiones de ventas.

En el transcurso de la última mitad del siglo XX, las tecnologías de la información han ido evolucionando y generalizando su utilización. Entre ellas las que asisten al proceso de diseño y la correspondiente integración con el proceso de fabricación: los sistemas CAD (“Computer Aided Design”, para la parte dedicada al diseño), los sistemas CAM (“Computer Aided Manufacturing”, para la fabricación) y los sistemas CAPP (“Computer Aided Process Planning”, para la planificación de los procesos). Aunque cada uno de ellos tiene un grado de madurez diferente debido a su evolución dentro del mercado (Gutiérrez Rubert, 2007). La utilización extendida de estos softwares dentro de los equipos de diseño ha hecho que la ingeniería concurrente los adoptará para realizar la labor del día a día.

La propia evolución de las tecnologías de la información ha permitido implantar herramientas de análisis que dan un mayor valor que la simple sistematización de procedimientos repetitivos. Entre las que se incluyen: los sistemas de ayuda a la toma de decisiones que analizan un problema ofreciendo diversas soluciones ponderadas o los sistemas expertos que han sido diseñados para resolver problemas complejos al igual que lo haría un experto en la materia.

Para los equipos de diseño el uso de estas herramientas permitirá complementar su conocimiento y experiencia (Aughenbaugh y Paredis, 2004; Johnson et al., 2002). Esta complementariedad es posible porque estas herramientas proporcionan información dentro de su especialidad y porque permiten incorporar nuevo conocimiento y realizar análisis transversales de los datos aportando la evaluación del máximo de soluciones.

Con este enfoque de la utilización de las tecnologías de la información, los equipos de diseño demandan sistemas/software más “inteligentes” que les ayuden en la evaluación de soluciones y de la toma de decisiones, debido a que los resultados y decisiones que se van tomando en las distintas fases del diseño condicionan al resto, siendo frecuente las vueltas atrás para cambiar el planteamiento en función del conocimiento que se va introduciendo. Esta retroalimentación es muy visible e influyente entre las fases de diseño y de fabricación. Por ejemplo, la elección de un u otro proceso de fabricación influenciará en el coste final de la pieza así como la planificación de la producción pero también al diseño si se adecúa éste al proceso de fabricación. Esta adaptación del diseño se recoge en la Figura 4, en donde la pieza (a) es fabricada con seis procesos diferentes: (b) fundición, (c) sinterizado, (d) forja, (e) soldadura, (f) fresado y (g) plegado.

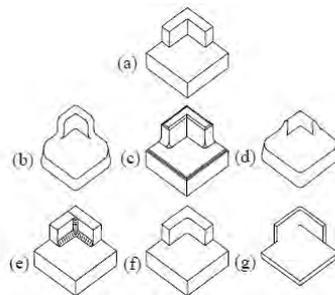


Figura 4 – Varias alternativas de diseño según el proceso de fabricación, fuente: (Magrab, 1997).

A lo largo de este apartado se ha puesto en evidencia la necesidad de utilizar herramientas de análisis para gestionar el vínculo entre diseño y fabricación. Aportar estas herramientas de análisis ayuda a los equipos de diseño en su labor de asegurar el éxito del diseño final.

1.2 Motivación de la tesis

A partir del dominio de aplicación planteado se observa la relevancia de integrar aspectos de fabricación entre las etapas de diseño, así como también la necesidad de crear herramientas informáticas que ordenen la globalidad de la información disponible durante estas etapas y que permitan filtrarla para obtener propuestas de diseño consistentes y globales.

La investigación ha enfocado la resolución de este dominio desde cuatro puntos de vista. El primero está relacionado con *La selección de procesos de fabricación* (Gupta et al., 2003; Swift y Booker, 2003; Esawi y Ashby, 1998a; Giachetti, 1998; Lovatt, 1998), cuyo objetivo es elegir aquellos procesos de fabricación que son técnicamente y económicamente viables para realizar el diseño propuesto. El segundo, *Diseñar para fabricar* (Kasarda et al., 2007; Bralla, 1999) propone reglas a cumplir en un diseño para que éste sea fabricable por un determinado proceso y se pueda optimizar su rendimiento técnico y económico. El tercero se compone por *Los manuales sobre procesos de fabricación* (Groover, 1996; Davis y American Society for Metals, 1990) que estudian en profundidad procesos de fabricación y definen sus ventajas, sus problemáticas y sus condicionantes. Y por último, *La planificación de la fabricación* (Ciurana et al., 2008; Denkena et al., 2007) establece la parte más operativa de la fabricación del diseño, así como el entorno de fabricación a ser utilizado.

Estos campos de investigación facilitan la consideración de los procesos de fabricación durante el desarrollo de las diferentes etapas del diseño, pero cuando los equipos de diseño realizan la tarea de ‘*macroplanificación*’ tienen interés en rebuscar entre los procesos de fabricación y establecer secuencias (cadenas) de procesos de fabricación para fabricar el diseño. Esta tarea hace que los campos de investigación mencionados anteriormente sean visiones parciales de la misma problemática. Por ejemplo, las soluciones planteadas desde la ‘*Selección*’ buscan una correlación perfecta entre la información de diseño y la información de los procesos de fabricación, utilizando los atributos de diseño y las capacidades de los procesos de fabricación. Mientras que los ‘*Manuales sobre procesos de fabricación*’ contienen un amplio volumen de información sobre cómo los procesos de fabricación pueden afectar al diseño desde las fases iniciales de su desarrollo. Sin embargo estos cuatro campos de investigación forman los fundamentos para obtener nuevas soluciones.

La utilización de la estrategia *divide y vencerás* para determinar la fabricación de un diseño comporta en este contexto un incremento de los factores a tener en cuenta. Por ejemplo, (i) cada resultado parcial empezará de unas condiciones iniciales diferentes, (ii) no todos los valores finales del diseño deberían ser exigidos a todos los procesos del resultado agregado, (iii) el orden de los procesos dentro del

resultado agregado es importante, (iv) el resultado agregado debe de ser técnicamente correcto y económicamente viable, etc. Esta breve lista de factores a tener en consideración durante la elaboración de las diversas alternativas de fabricación del diseño pone de relevancia que realizar de forma manual esta tarea sería realmente costoso sobre todo cuando se precisa realizar un análisis exhaustivo. Del mismo modo, la obtención de datos comparables entre procesos de fabricación y vinculados a criterios económicos tampoco es una tarea trivial, así como considerar todas las relaciones que unen los procesos entre sí.

Por lo tanto, la motivación de desarrollar un procedimiento sistemático para la obtención de alternativas de fabricación adquiere su importancia. En concreto, para los equipos de diseño representa poder analizar los diseños dentro del espacio definido por los procesos de fabricación, acompañar sus evaluaciones con comparaciones numéricas y descubrir alternativas analíticas complementado a las deducidas a través de la experiencia.

1.3 Objetivos

El objetivo final de esta tesis es ***proponer un algoritmo para la obtención de cadenas de procesos de fabricación*** que permitan a los equipos de diseño saber cómo los diseños que aún están en fase de desarrollo puede ser fabricados.

Así pues, el objetivo final anteriormente enunciado se concreta en un seguido de metas parciales a alcanzar en esta disertación:

- Revisar los estudios previos y trabajos relacionados con referencia a la construcción de cadenas de procesos de fabricación, así como sus antecedentes en la selección de procesos de fabricación, técnicas de integración entre el diseño y la fabricación, y los sistemas CAD.
- Capturar y definir de forma explícita la información disponible en el boceto del diseño desarrollado en un sistema CAD.
- Capturar y definir de forma explícita la información relevante de los procesos de fabricación y sus relaciones para seleccionar cadenas de procesos de fabricación.
- A partir de las estructuras capturadas para el producto y para los procesos de fabricación, elaborar un modelo de información que integre ambos aspectos, el de diseño y el de fabricación.
- Esquematizar en forma de un algoritmo los pasos a seguir para la construcción de cadenas de procesos de fabricación.
- Implementar un prototipo del algoritmo planteado en el paso anterior integrado en un sistema CAD.
- Comprobar el funcionamiento del algoritmo y sus resultados con diferentes casos de estudio.

1.4 Plan de desarrollo

El desarrollo que se ha seguido para realizar esta tesis se estructura a continuación.

1. Análisis

- Análisis de la literatura existente sobre las cadenas de procesos de fabricación y el ámbito en donde desarrollarlas.
- Análisis de la literatura existente en campos de investigaciones afines: métodos para la selección de procesos de fabricación, planificación de la fabricación, integración con los sistemas CAD y diseño para fabricar.

2. Realizar un modelo funcional

- Estructurar el flujo de información que es usado para la confección de las cadenas de procesos de fabricación.
- Definir las principales actividades que son necesarias para la confección de las cadenas de procesos de fabricación.
- Definir y formalizar la base de conocimiento a ser usada en el algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación.

3. Modelado del algoritmo

- Definir la arquitectura del sistema y el entorno tecnológico.
- Estructurar el modelo funcional en componentes programables y modelar el comportamiento de los componentes.
- Definir la estructura y la información del algoritmo formalizado

4. Implementar la aplicación

- Analizar el contexto en donde se implementará la aplicación.
- Programar tanto el algoritmo de derivación de cadenas como la aplicación que la conectará con el sistema CAD.
- Inicializar la base de conocimientos con valores reales de los procesos de fabricación tenidos en consideración

5. Evaluar los resultados obtenidos mediante la aplicación

- Realizar el diseño de los ejemplos seleccionados sobre el sistema CAD
- Aplicar el algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación sobre los modelos creados.
- Analizar los resultados obtenidos.

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, metodologías, integración de información en los sistemas CAD.
- Software Autodesk® Inventor, Microsoft® Visual Basic para aplicaciones, Microsoft® Access, Microsoft Visio.
- Integration Definition for Function Modeling (IDEFØ).
- Lenguaje de Modelado Unificado (UML).
- Consulta a expertos en la materia.

1.6 Contenido de la tesis

La redacción de esta memoria se ha estructurado en 6 capítulos, cuyo contenido se comenta a continuación de forma breve.

- Capítulo 1 Introducción. Presenta el dominio de aplicación y la motivación de la tesis, los objetivos, el plan de desarrollo y la estructura del trabajo
- Capítulo 2 Estado del arte. Expone la revisión literaria de los principales campos de investigación que afectan al dominio de aplicación de este trabajo: Selección de procesos de fabricación, Diseño para la fabricación (DFM) y análisis de la fabricabilidad, Planificación del proceso de fabricación, Sistemas CAD y la integración con la

selección. Concluye este capítulo con el establecimiento del problema, en donde se resumen los puntos claves que dan entrada a esta tesis.

- **Capítulo 3 Fundamentos y estrategias para la derivación de cadenas de procesos de fabricación.** Desarrolla el marco teórico y los conceptos básicos en donde la derivación de cadenas de procesos de fabricación se usará. En una segunda parte y bajo la tutela de la metodología IDEF, se desarrolla los pasos a seguir para obtener cadenas de procesos de fabricación a partir de la información de diseño y validándolo con un ejemplo. Finaliza el capítulo presentando en forma esquemática los principales pasos de la derivación de cadenas de procesos de fabricación.
- **Capítulo 4 Modelado del algoritmo de derivación.** Recoge el análisis y el resumen hecho en el Capítulo 3 para transformarlo en funciones programables de una aplicación informática. Esta modelización de las funciones se realiza con el lenguaje UML. Dando el contexto de actuación de la aplicación (diagramas de casos de uso), complementado con una visión estática de la aplicación (diagrama de clases) y con una visión dinámica (diagrama de secuencias).
- **Capítulo 5 Descripción y validación de la aplicación.** Muestra la aplicación implementada presentando el camino a seguir por el usuario para obtener resultados y saberlos interpretar. Esta explicación se complementa con dos ejemplos de piezas comerciales; émbolo de un sistema de vasos comunicantes y una pinza de portabrocas.
- **Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros.** Finalmente se presentan las conclusiones y aportaciones alcanzadas con la redacción de esta tesis y se plantean una serie de ideas para la continuación de este trabajo.

Capítulo 2 Estado del arte

En este capítulo se revisa la literatura existente en concordancia con el dominio de aplicación. La creación de cadenas de fabricación ha sido analizada desde diversos ángulos: métodos para la selección de procesos de fabricación, ámbito de trabajo de las cadenas, planificación de la fabricación, integración de la selección con los sistemas CAD y diseño para fabricar.

El análisis se realiza con la finalidad de: analizar los trabajos realizados en este dominio de aplicación; presentar los beneficios y dificultades de las soluciones propuestas hasta el momento; concretar la necesidad de información necesaria para poder confeccionar cadenas de procesos de fabricación como también la tipología de esta información; determinar el punto en el proceso de diseño en donde adquiere mayor relevancia el establecimiento de la cadena y las posibilidades de integración con los sistemas CAD.

2.1 Selección de procesos de fabricación

La selección de procesos de fabricación pretende responder a la pregunta ¿Cuál es “el mejor” proceso de fabricación para fabricar un diseño? Para poder responder a esta pregunta, la selección de procesos guía a los ingenieros de diseño o de fabricación en la elección del proceso de fabricación más adecuado para alcanzar los requisitos del diseño y las restricciones propuestas.

Hasta antes de la década de los 90 del siglo XX, los ingenieros de diseño o de fabricación se apoyaban en sus propias experiencias acumuladas alrededor de los procesos de fabricación para seleccionarlos y adaptar sus diseños. A consecuencia del cúmulo de incorporaciones producidas en el campo de la fabricación a lo largo del siglo XX y con el panorama actual donde la industria tienen a su disposición esta amplia variedad de procesos de fabricación (Ashby et al., 2004), en los años 90 se empezaron a desarrollar las primeras propuestas de métodos de selección de procesos de fabricación para facilitar a los ingenieros la labor de selección.

La selección de procesos de fabricación se debe realizar durante el proceso de diseño, debido a las influencias que pueden ejercer la elección de uno u otro proceso de fabricación sobre el producto final. Dichas influencias deberían tomarse en consideración desde las etapas iniciales del diseño, ya que es en este momento cuando se deciden los principales aspectos con los que se pretenden satisfacer los requisitos establecidos por el cliente, así como también las diferentes necesidades planteadas para el resto del ciclo de vida del producto. Incluso se llega hasta el punto de considerar las necesidades una vez el producto llegue al fin de su vida útil o *end-of-life*.

El proceso de diseño no es un bloque homogéneo sino más bien un camino con diferentes etapas, entre las cuales se definen las siguientes (Pahl et al., 2007): conceptual, materialización y detalle. De estas tres etapas, la más adecuada para tener en consideración las influencias y restricciones de los procesos de fabricación es la de materialización (Lovatt y Shercliff, 1998b).

La etapa de materialización desarrolla a partir de un concepto, y con la ayuda de conocimientos y criterios técnicos y económicos se determina la distribución del diseño. Esta distribución incluye: las formas geométricas, dimensiones, materiales de los componentes y piezas; las cuales se articulan para asegurar la realización de las funciones y cumplir con las especificaciones exigidas. Durante la realización de las diversas distribuciones, aparecen importantes interrelaciones entre aspectos de

diseño que hay que considerar de forma conjunta para obtener una solución global. A destacar la influencia que ejercen los aspectos de la forma, el material y el proceso de fabricación. Por ejemplo, la elección del material limita determinados aspectos de forma y procesos de fabricación que lo podrán procesar, de la misma forma que la elección de un proceso de fabricación en concreto afecta en la forma de la pieza que se puede conseguir y en los materiales con los que se puede realizar (Fernández García et al., 2010; Ferrer, 2007).

Estas restricciones como consecuencia de las interrelaciones entre los aspectos de forma, material y procesos de fabricación permiten observar la relevancia que adquiere la utilización de los métodos de selección de procesos de fabricación. A lo que se pueden sumar otros tres motivos: el primero es el cúmulo de procesos de fabricación que existen, donde se incluyen tanto los tradicionales como los nuevos o adaptaciones que han ido surgiendo a lo largo de los años; se calcula que hay más de un millar de procesos de fabricación. El segundo es la amplia cantidad de información y de conocimientos que hay asociado con cada uno de los procesos de fabricación. Y el tercero, la fuerte presión en los equipos de diseño para desarrollar diseños económicos.

Expuestos los antecedentes, a continuación se detallan los diferentes métodos utilizados para la selección de procesos de fabricación, así como también cómo se ha modelado la información para los mismos y las herramientas desarrolladas que permiten la selección.

2.1.1 Métodos para la selección de procesos de fabricación

Los métodos para la selección de procesos de fabricación son una sistematización del procedimiento para la elección del mejor proceso de fabricación. Estos métodos se basan en preguntar al ingeniero sobre una serie de atributos de diseño, que serán usados para seleccionar diferentes procesos de fabricación disponibles dentro de una base de conocimiento.

Estos métodos se clasifican, según la forma de interactuar con los ingenieros, en tres estrategias diferentes (Ashby et al., 2004): de búsqueda libre, basadas en cuestionarios y basadas en casos. La Figura 5 muestra de forma esquematizada las tres estrategias y su relación con la información de diseño entrante y los resultados obtenidos.

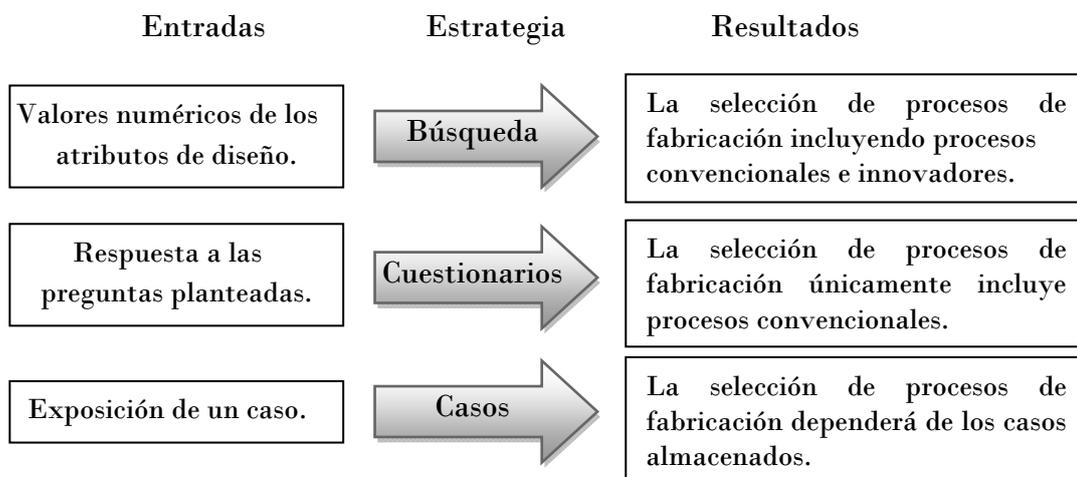


Figura 5 – Esquema de las estrategias de selección.

a) *Estrategia de búsqueda libre*

Se describe la estrategia de búsqueda libre como un análisis cuantitativo de los atributos de diseño para relacionarlos con los procesos de fabricación. En otras palabras, se realiza una comparación directa entre dos valores de un mismo atributo, uno proveniente del conjunto de datos de diseño y el otro del conjunto de datos de los procesos de fabricación. Los atributos, en el campo de la selección de procesos de fabricación, se han definido como un conjunto de propiedades y restricciones que resumen un proceso de fabricación y permite la comparación directa con la información de diseño (Lovatt y Shercliff, 1998a).

Para poder aplicar la estrategia de búsqueda libre es indispensable disponer de los valores de los atributos que se deseen comparar o de aquellos atributos que sean necesarios para hacer la selección. Al hacer comparativa analítica permite obtener tanto resultados conservadores como innovadores (Ferrer, 2007; Ashby et al., 2004), porque las comparaciones de los atributos son directas y objetivas (Ferrer, 2007).

En la Figura 6 describe de forma gráfica los elementos que toman parte en la selección de procesos de fabricación mediante la búsqueda libre.

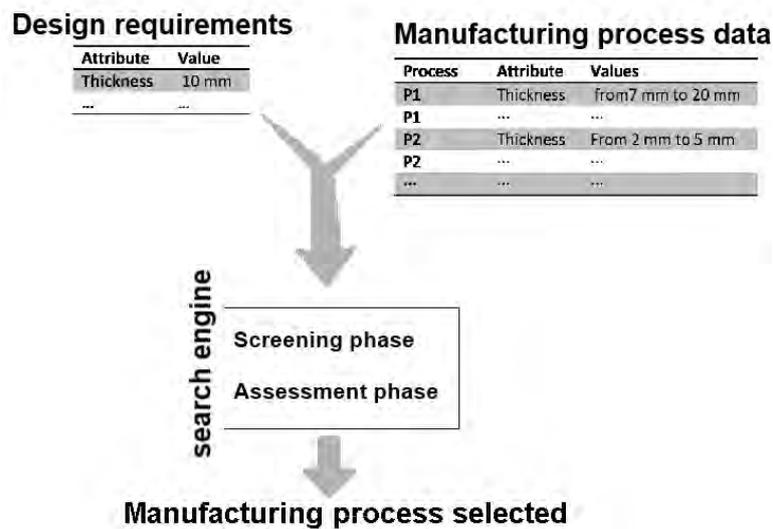


Figura 6 – Contexto donde se desarrolla la búsqueda libre.

La implementación de esta estrategia se desarrolla mediante un motor de búsqueda que recibe como entradas las especificaciones de diseño y la información de los procesos de fabricación. Las especificaciones de diseño son el conjunto de atributos que resumen el diseño. Mientras que la información de los procesos de fabricación resume las capacidades de un proceso con las cuales se fabrican los diseños. Estos motores de búsqueda se estructuran en dos fases, una primera llamada discriminación y una segunda llamada graduación o *ranking* (Shercliff y Lovatt, 2001).

- El objetivo de la fase de discriminación es excluir de la lista de resultados a todos los procesos de fabricación que no cumplan con algunos de los atributos de diseño básicos. Por ejemplo, los procesos de fabricación que no sean capaces de procesar el material del producto o que una dimensión del producto no pueda ser asumida (Shercliff y Lovatt, 2001).
- El objetivo de la fase de graduación o *ranking* es evaluar de forma técnica como de bueno es el proceso de fabricación con relación a los atributos de diseño identificados por la aplicación (Shercliff y Lovatt, 2001). Después de realizar una valoración técnica de la idoneidad de los diferentes procesos de fabricación, los métodos inscritos dentro de esta estrategia suelen añadir una fase de valoración económica. En esta fase de valoración económica se realiza una estimación del coste de fabricación imputable al diseño con lo cual se permite ver cuáles de los procesos de fabricación viable, también lo son económicamente.

b) *Estrategia basada en cuestionarios*

Se describe la estrategia basada en cuestionarios como un conglomerado de preguntas planteadas al ingeniero de diseño o de fabricación sobre su diseño para ayudarle en la selección de los procesos de fabricación. En base a las respuestas proporcionadas por el ingeniero se obtienen los procesos de fabricación aptos para el diseño.

Para la elaboración de estos cuestionarios se pide a un conjunto de expertos que expliciten su experiencia en series de preguntas que permitan la selección de los diferentes procesos de fabricación almacenados. Por lo tanto, los resultados obtenidos son conservadores y no innovadores a causa de que las soluciones a las series de preguntas provienen de la experiencia de los expertos. En estos sistemas la actualización para la inclusión de nuevos procesos es muy costosa (Ferrer, 2007; Ashby et al., 2004). Un ejemplo de esta estrategia se encuentra en el trabajo de Er y Dias (Er y Dias, 2000).

c) *Estrategia basada en casos*

Se describe la estrategia basada en casos como el procedimiento de solucionar nuevos problemas con las soluciones de problemas anteriores similares. Esta estrategia necesita disponer de un conjunto de casos formalizados y resueltos para poder inferir el razonamiento (Peng et al., 2011). Los casos están compuestos por la explicación del problema resuelto, la solución ha dicho problema y de las palabras claves que serán utilizadas para relacionar los casos nuevos con los almacenados o viejos. El principal inconveniente en este tipo de sistemas es la definición de las palabras clave ya que si se ponen demasiado refinadas únicamente se obtendrá solución cuando el caso nuevo y el almacenado sean el mismo o por lo contrario, si se usan palabras clave demasiado genéricas no habrá una discriminación dentro de los casos viejos (Ferrer, 2007; Ashby et al., 2004).

Responder a la pregunta de cuál de las tres estrategias anteriores es mejor para resolver el problema de la selección, no tiene una respuesta única y dependerá del contexto en que se desarrolle la selección de los procesos de fabricación ya que cada una de las estrategias tiene sus pros y sus contras. Pero desde el punto de vista de la investigación la estrategia de búsqueda libre es la más utilizada (Ferrer, 2007), pues es la que permite considerar todos los procesos: convencionales e innovadores.

Dentro de la estrategia de búsqueda libre, se encuentra un amplia lista de investigadores: (Skander et al., 2008; Ashby et al., 2004; Esawi y Ashby, 2004; Gupta et al., 2003; Smith et al., 2003; Shercliff y Lovatt, 2001; Esawi y Ashby, 2000;

Feng y Zhang, 1999; Esawi y Ashby, 1998a; Esawi y Ashby, 1998b; Esawi y Ashby, 1998c; Giachetti, 1998; Lovatt y Shercliff, 1998a; Lovatt y Shercliff, 1998b; Gupta et al., 1997; Ishii et al., 1991). Todos ellos desempeñan su investigación en el desarrollo de algoritmos de búsqueda libre basados en comparar el conjunto de procesos de fabricación con aspectos claves del diseño del producto. Para reducir la exploración de los procesos de fabricación algunos autores, como por ejemplo Gupta, introducen técnicas heurísticas, como la técnica de ramificación y poda (Gupta et al., 2003).

2.1.2 Modelado de la información para la selección de procesos de fabricación

Como se ha indicado en el apartado 2.1.1, los métodos de selección se construyen sobre una base de conocimiento que almacena la información de los procesos de fabricación. Por ello, se ha analizado como se estructura la información de los procesos de fabricación para los algoritmos de búsqueda libre, ya que son los más utilizados según se aprecia en la revisión de la literatura presentada.

Los algoritmos de selección basados en la búsqueda libre se basan en comparar los procesos de fabricación almacenados con información específica extraída del diseño propuesto. Para lograr esta comparación, los algoritmos de selección trabajan sobre una representación simplificada y homogenizada de los procesos de fabricación para poder ser almacenados en una base de datos (Mauchand et al., 2008).

Esta representación está compuesta por un conjunto de atributos que describen de forma genérica los procesos de fabricación. La finalidad de estos atributos es definir los límites de las capacidades de los procesos de fabricación para fabricar los productos, por ejemplo el peso de la pieza, la rugosidad o tipología de la sección transversal. Para una mayor comprensión se explican a continuación un par de los ejemplos mencionados. En el primero, se trata la capacidad de fabricar una pieza con un peso determinado. Por ello cada proceso mediante el atributo “peso” indica el peso de la menor pieza fabricable por el proceso así como el peso de la pieza más grande (ej. el proceso de fundición puede fabricar piezas entre 100 g y 2 kg (Kalpakjian, 2006)). El segundo ejemplo es la capacidad de los procesos para realizar diferentes tipos de sección transversal, donde el atributo “realiza secciones transversales constantes” puede tener el valor sí o no.

Con los ejemplos expuestos, se intuye que se debe modelar dos aspectos. Un aspecto es determinar el conjunto de atributos que caracterizan los procesos de fabricación y el otro definir la tipología de los diferentes atributos. Relacionado con el conjunto de atributos que definen los procesos de fabricación, los autores (Feng,

2005; Gupta et al., 2003; Smith et al., 2003; Esawi y Ashby, 1998b; Giachetti, 1998; Lovatt y Shercliff, 1998b) han estudiado qué capacidades son las más decisivas para poder filtrar los procesos de fabricación y en qué atributos se especifican para dar buenos resultados de selección. En el trabajo de Ferrer (Ferrer, 2007) se realiza una recopilación de los atributos utilizados por los principales autores. Los resultados de esta recopilación se muestran en la Tabla 1.

Atributo	Detalle de los atributo	Tipología
Volumen	Longitud	Numérico
	Alto	Numérico
	Ancho	Numérico
	Dimensión máxima	Numérico
Peso		Numérico
Tolerancias	General	Numérico
	Más restrictiva	Numérico
Acabado superficial	General	Numérico
	Más restrictiva	
Sección de pared		Numérico
Otros	Diámetro mínimo del agujero	Numérico
	Radio mínimo de l canto	Numérico
	Ratio de aspecto	Numérico
	Ratio de sección adyacente	Numérico
	Factor de calidad	Numérico
Producción	Volumen de producción	Numérico
	Tiempo mercado	Numérico
	Coste de producción	Numérico
Geometría	Forma	Catagóricos
	Complejidad	Catagóricos
Material		Catagóricos
Características geométricas	<i>Un subconjunto de las especificadas por la ISO 10303</i>	Catagóricos

Tabla 1 – Lista de los parámetros considerados para definir un procesos.

Como se aprecia en la Tabla 1, la descripción del proceso de fabricación alberga datos dimensionales, de calidad y de producción. En la última columna de la tabla se ha explicitado el tipo de datos que almacenará el atributo, y se han distinguido dos clases: los atributos numéricos/cuantitativos y los atributos catagóricos.

2.1.2.1 Atributos numéricos/ cuantitativos

Un atributo numérico es aquel que es medible y expresable con números (Ashby et al., 2004). Dependiendo de la complejidad de la información del atributo, se clasifican en tres tipos: valor simple, rango de valores o definidos mediante funciones (Lovatt y Shercliff, 1998a).

- a) Los atributos definidos como un valor simple son aquellos atributos que se definen mediante un único valor y que generalmente tienen poca variación. Por ejemplo, sería el caso de calificar como 10 (bueno) o 5 (regular) el “acabado superficial” que es capaz de conseguir en una pieza un determinado proceso de fabricación (Lovatt y Shercliff, 1998a).
- b) Los atributos definidos como rango de valores son aquellos en que su información está definida mediante un intervalo numérico acotado por un límite superior o máximo y por un límite inferior o mínimo. El establecimiento de los límites se realiza considerando las posibilidades técnicas del proceso de fabricación así como la viabilidad económica (Yu et al., 1993). Por ejemplo, el atributo “peso” del proceso de pulvimetalurgia está limitado por el rango [0,01 - 5] kg. Lo cual significa que este proceso podrá fabricar piezas cuyo valor de peso esté incluido dentro de dicho rango.

Para almacenar este tipo de atributos se realiza con el valor mínimo y el valor máximo dando por hecho que todos los valores comprendidos entre ellos son alcanzables por el proceso de fabricación determinado. Esta forma de almacenaje proporciona intervalos más generales comparando con la siguiente estrategia.

Esta estrategia alternativa para almacenar los atributos de tipo rango consiste en estructurar el atributo en diferentes niveles, donde cada nivel tiene su rango definido en función del proceso considerado. De esta manera en el proceso superior se almacenan los valores más generales del atributo (*método*, en Figura 7) y al ir descendiendo a niveles más detallados, los valores del atributo también se refinan (*familias, grupos y variantes*, en Figura 7). Así pues los valores de un nivel superior equivaldrán a la yuxtaposición de todos los niveles inferiores relacionados. A modo de ejemplo, la Figura 7 muestra esta estructura de niveles para el atributo “grosor de corte” para el contorneado en acero dulce. En el nivel *método* mostrando su visión agregada, así como su descomposición en sucesivos niveles, *familia, grupo y variante* (Lovatt y Shercliff, 1998a).

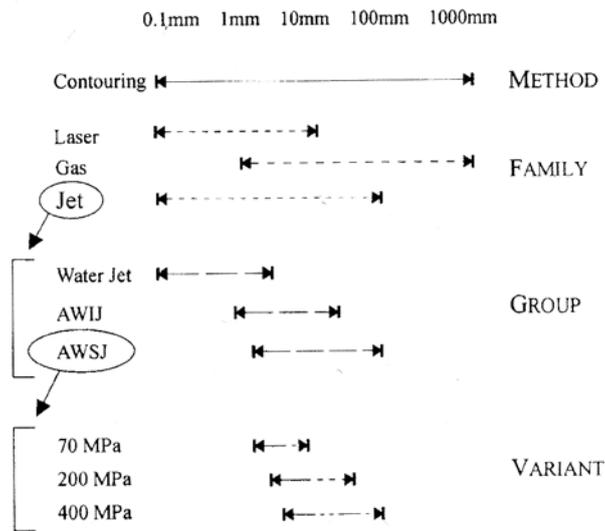


Figura 7 – Desglose del atributo “grosor de corte” para contorneado en acero dulce, fuente: (Lovatt y Shercliff, 1998a).

Giachetti define para un mismo atributo cuatro valores formando dos rangos: el optimista y el pesimista (Figura 8). El rango pesimista representa los casos más frecuentes de utilización de este atributo por el proceso de fabricación. En cuanto al rango optimista, se calcula utilizando lo mejor del proceso de fabricación (tanto en maquinaria, como en herramientas, como en las condiciones de trabajo, etc.) que se puede utilizar para alcanzar la mayor amplitud del intervalo. Por lo tanto, los valores límites obtenidos a partir de este escenario se entiende que serán más difíciles de producir. El rango *optimista* (valores *a* y *d* en la Figura 8) incluye forzosamente el rango *pesimista* (valores *b* y *c*). Tal y como se observa en la Figura 8, Giachetti también introduce el grado de compatibilidad (Giachetti, 1998).

El grado de compatibilidad es el factor que indica la probabilidad en que un proceso es capaz de alcanzar un valor concreto dentro del rango optimista. Como ya se ha mencionado con anterioridad, la probabilidad para el rango pesimista será del 100 % (reflejado en la Figura 8 con el valor 1). La situación cambia cuando se analiza los extremos del rango optimista, ya que en los extremos se exige lo mejor, en consecuencia se disminuye el grado de compatibilidad del proceso. Esta disminución de probabilidad va desde los extremos del rango pesimista (100 %) hasta los extremos del rango optimista (0 %).

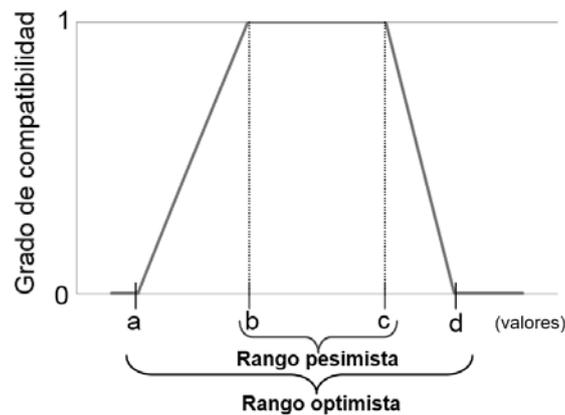


Figura 8 – Representación gráfica de la compatibilidad de un atributo, fuente: (Giachetti, 1998).

- c) Los atributos definidos mediante una función matemática son aquellos atributos que para determinar su valor se requiere de los datos de otros atributos con los cuales hay cierta correlación. Se recorre a esta forma de expresar los valores de un atributo cuando la correlación entre los diferentes atributos impide expresarlos mediante un rango de valores aislados. No obstante esta forma de expresión se puede limitar a un ámbito de aplicación concreto. En la Figura 9 se ha representado gráficamente la correlación entre los atributos “grosor del material” a soldar con la “velocidad” de soldadura (Lovatt y Shercliff, 1998a), además en la figura también se ha representado el ámbito de aplicación que se establece entre los límites de rango de velocidad y grosor determinados.

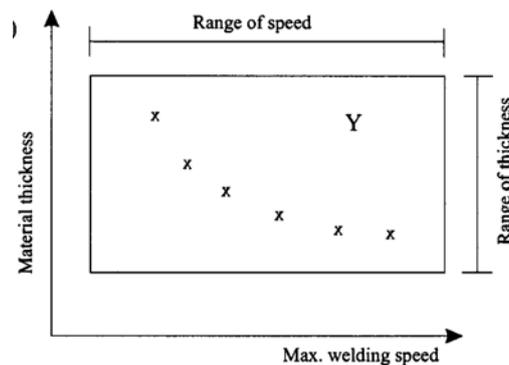


Figura 9 – Efecto de correlación sobre la viabilidad de los rangos de atributos en la soldadura, fuente: (Lovatt y Shercliff, 1998a).

2.1.2.2 Atributos cualitativos

Los atributos cualitativos son aquellos que se definen dentro de un conjunto limitado de elementos descriptivos, es decir, no cuantificables. Existen de tres tipos: booleanos, de graduación o de jerarquía (Ashby et al., 2004).

- a) Los atributos definidos mediante valores booleanos son aquellos que se pueden plantear como una pregunta simple en la cual únicamente se puede contestar con dos opciones posibles. Por ejemplo, ¿el proceso genera anisotropía? la respuesta es sí o no. También es usado en atributos que ofrecen la elección entre dos valores mutuamente excluyentes, por ejemplo si el proceso puede conseguir secciones regulares o irregulares (Giachetti, 1998; Ishii et al., 1991).
- b) Los atributos definidos mediante una graduación son aquellos que se expresan mediante una secuencia ordenada de palabras significativas (ej.: elevado, moderado o bajo), las cuales generalmente se han substituido por un conjunto finito de números enteros, donde cada número substituye a una palabra. Por ejemplo, los “defectos” que pueden aparecer en la pieza a causa del proceso de fabricación se pueden representar como: un proceso con un *elevado* riesgo de defectos, con un riesgo *medio o bajo*.
- c) Los atributos definidos mediante una jerarquía son aquellos en que el atributo está organizados en un sistema de diferentes niveles de importancia o especialización y su valor dependerá del lugar que ocupa dentro de la jerarquía que se define. Los atributos definidos mediante una jerarquía son representados en forma de árbol. Dentro de la tipología de atributos jerárquicos se circunscriben los atributos de “material” y de “forma”.

2.1.2.3 Atributo material

El atributo “material” ha sido ampliamente estudiado y además con gran profundidad; especialmente en relación con las propiedades físicas y químicas. Mediante estos estudios se han ido clasificando y construyendo una jerarquía de familias de materiales en función de dichas propiedades.

En el marco de la selección de los procesos de fabricación se establece el atributo “material” en forma de árbol jerárquico, que permitirá al ingeniero hacer una exploración más ágil de las posibilidades que existen. Para cada proceso de fabricación se enlaza con los materiales que es capaz de procesar, esta unión se establece de forma convencional (Ferrer, 2007; Swift y Booker, 2003; Giachetti, 1998; Lovatt, 1998). La Figura 10 muestra de una forma gráfica los primeros niveles de la jerarquización de los materiales clasificados según su composición química.

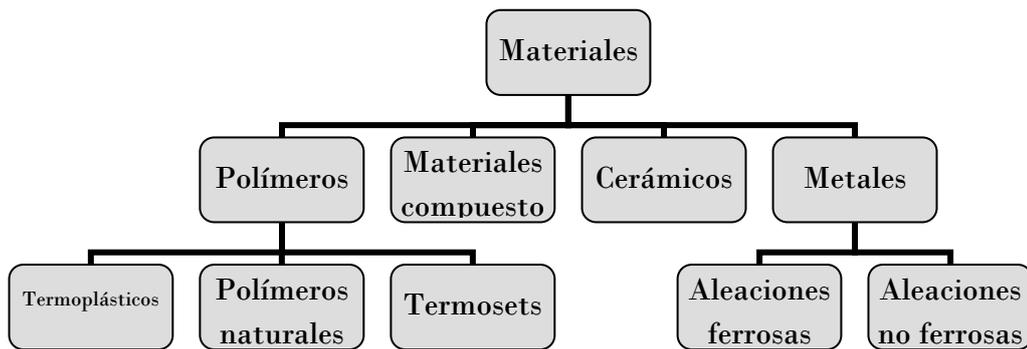


Figura 10 – Primeros niveles de la clasificación de materiales propuesta por Swift & Booker, fuente: (Swift y Booker, 2003).

2.1.2.4 Atributo forma

El atributo “forma” pretende sintetizar el aspecto físico del diseño, se suele definir como un atributo cualitativo (Gupta et al., 2003). Este atributo tiene un alto grado de subjetividad, por parte del ingeniero de diseño o fabricación, con respecto al resto de atributos aquí presentados. Por lo tanto, estructurarlo como un atributo cualitativo no será trivial. Además, se tiene que tener en cuenta que los procesos de fabricación imponen ciertas limitaciones con respecto a las formas que podrán elaborar cada uno de ellos.

Teniendo presente estas limitaciones, es necesario imponer una definición del atributo “forma” suficientemente amplia para albergar la totalidad de los diseños posibles y que al mismo tiempo reduzca la subjetividad en el proceso de clasificar la forma de un diseño en concreto. Por estas razones, se han reducido la multitud de diseños a un conjunto limitados de formas.

Las formas incluidas en las jerarquías de “forma” propuestas son una generalización de todo un subconjunto de formas y harán de referencia para clasificar el nuevo diseño. De esta manera, el ingeniero de diseño o de fabricación solamente tendrá que buscar cuál de las formas de referencia presentadas se aproxima más a su diseño.

En la literatura relacionada con la selección de procesos de fabricación se han establecido varias propuestas para clasificar las formas, como son las que presentan: Feng (Feng, 2005), Swift & Booker (Swift y Booker, 2003) o Gupta (Gupta et al., 2003).

- a) La propuesta realizada por Feng (Feng, 2005) propone diez categorías de superficies primarias y las combina con ocho complejidades. De forma que combinando cada superficie con las diferentes complejidades se obtiene la tabla de formas definida en la Figura 11.

Complexity \ Shape	0 Uniform Cross section	1 Change at end	2 Change at center	3 Spatial curvature	4 Closed, Hollow, one end	5 Closed, Hollow, both ends	6 Transverse (Protrusion)	7 Irregular
0 Round								
1 Sphere								
2 Cone								
3 Wire								
4 Ring								
5 Bar								
6 Tube								
7 Hat								
8 Structure								
9 Frame								

Figura 11 – Formas genéricas resultantes después de combinar las superficies con las complejidades, fuente: (Feng, 2005).

- b) La propuesta de Gupta (Gupta et al., 2003) distingue una “forma general” (Figura 12) y la complementa con las “características geométricas” (Figura 13) necesarias para modificar esta forma general y aproximarla al diseño.

La “forma general”, tal y como se observa en la Figura 12, se define como una estructura jerárquica que permite al ingeniero de diseño o de fabricación navegar por ella e ir describiendo la “forma general” de su diseño. En los extremos de la jerarquía se esquematiza un boceto genérico de la pieza resultante. Pero para alterar esta “forma general”, Gupta propone cinco posibles características (Figura 13) que se pueden añadir al boceto genérico con la finalidad de representar las diferentes formas existentes de diseño.

- c) La propuesta de Swift (Swift y Booker, 2003) está estructurada en tres categorías de formas básicas: de revolución, prismáticas y de plancha de metal, que a su vez se subdivide en cinco grupos de complejidad. Estos grupos de complejidad están ordenados, empezando por el grupo 1 con la menor complejidad y a medida que va incrementando el número del grupo va aumentando la complejidad de sus piezas.

Para ayudar a discernir a qué grupo pertenece un diseño, el autor esbozó (Figura 14) una serie de ejemplos que ilustran las formas de las piezas que se pueden incluir dentro de cada grupo. Además, en el pie de cada ilustración se agregó una lista con características relevantes de las formas que componen la complejidad del grupo para ayudar en la elección de la misma.

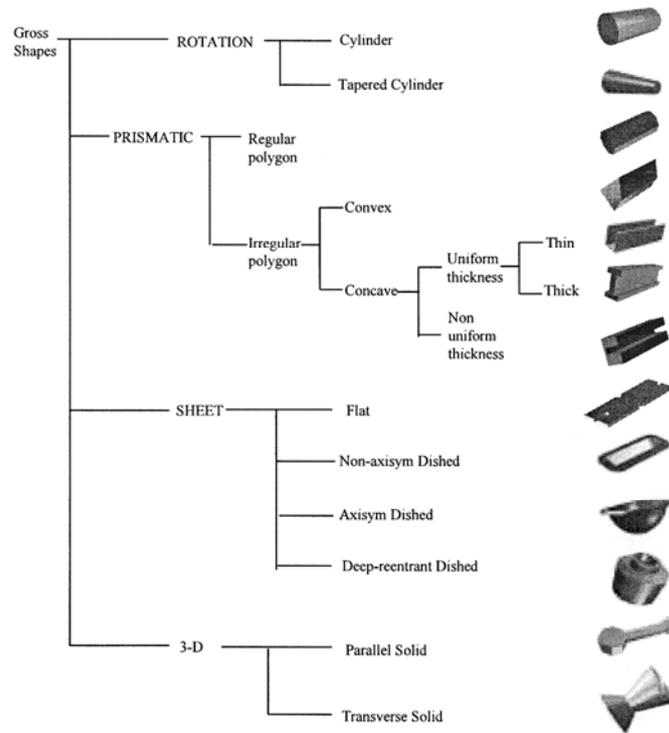


Figura 12 – Jerarquía de geometrías genéricas propuesta por Gupta et al., fuente: (Gupta et al., 2003).

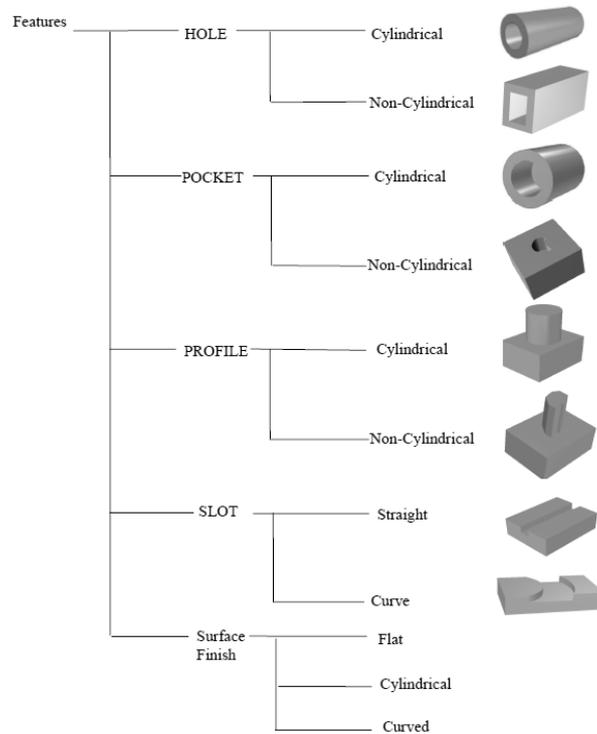
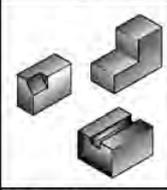


Figura 13 – Jerarquía de características geométricas propuestas por Gupta et al., fuente: (Gupta et al., 2003).

A  Part Envelope is Largely a Solid of Revolution				
Single/Primary Axis		Secondary Axes: Straight line features parallel and/or perpendicular to primary axis		Complex Forms
Basic rotational features only	Regular secondary/repetitive features	Internal	Internal and/or external features	Irregular and/or complex forms
A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
				
Category Includes: Rotationally symmetrical/grooves, undercuts, steps, chamfers, tapers and holes along primary axis/centre line	Internal/external threads, knurling and simple contours through flats/splines/keyways on/around the primary axis/centre line.	Holes/threads/counterbores and other internal features not on the primary axis.	Projections, complex features, blind flats, splines, keyways on secondary axes.	Complex contoured surfaces, and/or series of features which are not represented in previous categories

B  Part Envelope is Largely a Rectangular or Cubic Prism				
Single Axis/Plane		Multiple Axes		Complex Forms
Basic features only	Regular secondary/repetitive features	Orthogonal/straight line based features	Simple curved features on a single plane	Irregular and/or contoured forms
B 1	B 2	B 3	B 4	B 5
				
Category Includes: Through steps, chamfers and grooves/channels/slots and holes/threads on a single axis.	Regular through features, T-slots and ricks/plain gear sections etc. Repetitive holes/threads/counter bores on a single plane	Regular orthogonal/straight line based pockets and/or projections on one or more axis. Angled holes/threads/counter bores.	Curves on internal and/or external surfaces.	Complex 3-D contoured surfaces/geometries which cannot be assigned to previous categories.

C  Flat Or Thin Wall Section Components				
Single Axis	Secondary/Repetitive Regular Features		Regular Forms	Complex Forms
Basic features only	Uniform section/wall thickness	Non-uniform section/wall thickness	Cup, cone and box-type parts	Non-uniform and/or contoured forms
C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
				
Category Includes: Blanks, washers, simple bends, forms and through features on or parallel to primary axis.	Plain cogs/gears, multiple or continuous bends and forms.	Component section changes not made up of multiple bends or forms. Steps, tapers and blind features.	Components may involve changes in section thickness.	Complex or irregular features or series of features which are not represented in previous categories.

Figura 14 – Clasificación de forma de Swift & Booker, fuente: (Swift y Booker, 2003).

Existen otras propuestas de jerarquía de formas que clasifican el atributo “forma” empleando diferentes criterios, en algunas clasificaciones toman más relevancia la geometría y en otras la relevancia recae en aspectos de fabricación (Yu et al., 1993). También se hallan propuestas de formas más concretas para procesos de fabricación específicos, por ejemplo las recogidas en los trabajos (Todd et al., 1994; Davis y American Society for Metals, 1990).

2.1.2.5 Clasificación de los procesos de fabricación

Considerando la amplia cantidad de procesos existentes, la selección resulta más ágil si los procesos están clasificados de forma que se pueda reducir el rango de procesos candidatos. Las clasificaciones de los procesos de fabricación varían según el objetivo propuesto para la clasificación en cuestión. Por ejemplo, la clasificación propuesta por la DIN 8580 agrupa los procesos dependiendo de como cambian la cohesión del material: crear, preservar, reducir, incrementar (Grote y Antonsson, 2008). Otro ejemplo es la clasificación propuesta por Lovatt and Shercliff (Lovatt y Shercliff, 1998b) donde los procesos de fabricación son clasificados según el grado en que pueden transformar la forma y por ello pueden ser: primarios, secundarios o terciarios. Los procesos primarios toman un trozo de material amorfo, ya sea en estado líquido, en polvo o en barras, y le dan la forma, por ejemplo los procesos de *moldeo*, *fundición* o *mecanizado*. Los procesos secundarios modifican añaden o mejoran características geométricas de un producto ya con forma por ejemplo los procesos de *mecanizado fino* o *pulido*. Finalmente, los procesos terciarios añaden calidad ya sea en la mayor parte del producto o en alguna superficie en concreto, por ejemplo los procesos de *pintura* o *granallado de una superficie*.

2.1.3 Herramientas para seleccionar procesos de fabricación

Después de haber expuesto los fundamentos de la estrategia de búsqueda libre, en este apartado se presentan diversas herramientas informáticas desarrolladas siguiendo esta estrategia:

Cambridge Engineering Selector (CES) (Esawi y Ashby, 2000; Lovatt, 1998) es una herramienta de selección que integra aproximadamente 3000 materiales y 125 procesos de fabricación y dispone de una versión comercial. Para alcanzar resultados en *CES*, el ingeniero debe introducir la información de diseño requerida para realizar la selección y de forma gráfica se visualizará el encaje de los diferentes procesos de fabricación seleccionados con respecto a la información de diseño introducida. Esta herramienta también proporciona una estimación del coste del producto final para los procesos de fabricación seleccionados. La herramienta *CES* puede proporcionar cadenas de procesos que permitirán fabricar la totalidad del diseño, pero para ello hay que refinar los datos de diseño que forman la entrada de la herramienta y hay que especificar el tipo de proceso que se va a seleccionar (*primarios*, *secundarios* o *terciarios*). Por lo tanto, estableciendo un conjunto de resultados para cada una de las tipologías de procesos de fabricación, se podrá componer de forma rudimentaria una cadena de procesos de fabricación.

Material and Manufacturing Process Selection (MAMPS) (Giachetti, 1998) es una herramienta para seleccionar materiales y procesos de fabricación. En esta herramienta se permite definir la importancia que tiene cada atributo en el proceso de la selección. Los resultados obtenidos de MAMPS únicamente contemplan una valoración técnica de los procesos y materiales elegidos.

Wizard for selection Process and Materials (WiSeProM) (Gupta et al., 2003) es una herramienta web con una base de conocimiento de 52 materiales y 31 procesos de fabricación. Esta herramienta devuelve la pareja material y procesos de fabricación primarios después de analizar el conjunto de atributos de diseño entrados por el ingeniero. Estos primeros resultados (las parejas material-proceso) más la inclusión de nuevos atributos de diseño son utilizados para completar las parejas con un segundo proceso de fabricación. Finalmente, la herramienta permite realizar una valoración económica del conjunto resultante.

Manufacturing Advisory Service (MAS 2.0) (Smith et al., 2003) es también una herramienta web, pero en este caso su base de conocimiento está formada por 16 materiales y 22 procesos de fabricación. Ha sido desarrollada como una herramienta de aprendizaje para obtener conocimiento sobre nuevos procesos de fabricación. El punto de partida de esta herramienta también es un conjunto de atributos de diseño introducido por el ingeniero para su comparación. Pero en este caso se valora, y se muestra de forma gráfica, cómo se adapta cada uno de los procesos de fabricación almacenados al conjunto de valores de los atributos de entrada.

Conceptual Process Planning (CPP) (Feng et al., 1999; Feng y Zhang, 1999) es un prototipo que implementa un modelo de actividades sobre la integración del diseño preliminar con la planificación de la fabricación. Desde el punto de vista del funcionamiento, este prototipo lee un archivo de atributos generados durante el diseño conceptual y con el que permitirá seleccionar los procesos de fabricación y estimar el coste de una de las alternativas.

No obstante, Feng (Feng et al., 2005; Feng, 2005) propone una nueva implementación del concepto de integración del diseño preliminar con la planificación de la fabricación debido a la rápida evolución de Internet. Esta nueva implementación se basa en los sistemas multi-agentes, ya que la tecnología de agentes provee de mecanismos de interacción tanto entre los diferentes agentes programados como de mecanismos de comunicación con software externo al sistema (navegador web o software de diseño, etc.). Los agentes programados en este prototipo incluyen: un agente de diseño, un grupo de agentes de planificación del proceso, un agente para el almacén de capacidades y un agente del control de la fabricación. Además de una interfaz gráfica para interactuar con el ingeniero. Por su lado, el agente de diseño se comunica con un sistema CAD mediante los conectores TCP/IP.

DFM_Peaux_Squelettes (Skander et al., 2008) es un prototipo de una herramienta de formalización de DFM, con el objetivo de aproximar cuanto antes las restricciones de fabricación al diseño. Para ello, almacena en su base de conocimiento diversos procesos de fabricación para ser asociados al diseño y obtener un conjunto de restricciones de diseño asociadas. Para la ejecución, se utiliza un esquema del producto reducido a las caras importantes, donde también se incluyen las características geométricas y a las relaciones entre ellas.

2.2 Selección de cadena de procesos de fabricación

La complejidad de los diseños ha aumentado en los últimos años debido al aumento de las prestaciones que deben tener los diseños y a que las especificaciones son cada vez más restrictivas y exigentes. Como consecuencia, generalmente es necesario utilizar más de un proceso de fabricación para fabricar la pieza en su totalidad, requiriendo así definir una cadena de procesos de fabricación.

La ‘*cadena de procesos de fabricación*’ se puede definir como la totalidad de procesos de fabricación, tomados como un secuencia ordenada de procesos de fabricación, que son capaces de cumplir con todos los requerimientos del producto (Denkena et al., 2007). Como se muestra en la Figura 15, esta cadena puede empezar a definirse desde las etapas iniciales del diseño, mediante el proceso de selección (Esawi y Ashby, 1998c), o en una fase de diseño avanzada, mediante el proceso de configuración (Denkena et al., 2007).

Seleccionar cadenas de procesos de fabricación significa identificar cada uno de los procesos que formarán parte de ella y que irán completando las especificaciones indicadas por el diseño. Para seleccionar cadenas de procesos se pueden usar las herramientas de selección de procesos comentadas en el apartado 2.1.3, usadas de forma repetida para cada nivel de la cadena. Lo cual significa seleccionar los procesos candidatos a ocupar en cada uno de los eslabones de la cadena de procesos de fabricación de forma aislada. No obstante, mediante este procedimiento no se consideran los procesos anteriores, ni tampoco la parte de la pieza que ha sido transformada por el proceso anterior, de modo que no se garantiza el éxito del resultado final.

Para seleccionar cadenas de procesos de forma vinculada hay que considerar dos aspectos fundamentales:

- Los procesos de fabricación que ya forman parte de la cadena de procesos de fabricación influyen en la nueva selección de procesos de

fabricación posteriores. Ya que no todas las combinaciones de procesos resultan tecnológicamente viables, pues no se puede primero mecanizar y luego forjar.

- Algunos atributos de diseño se pueden fabricar en diferentes etapas de la cadena, lo cual significa que se pueden obtener de forma parcial en los primeros procesos y de forma finalizada en el último. Tal y como muestra la Figura 15 los atributos se van transformando a lo largo de la cadena de procesos.

La influencia que ejercen los procesos de fabricación entre sí y el hecho que un proceso de fabricación es la entrada para el subsiguiente proceso que forma parte la cadena de procesos de fabricación, está representado en la Figura 15 en las cadenas (I) y (II).

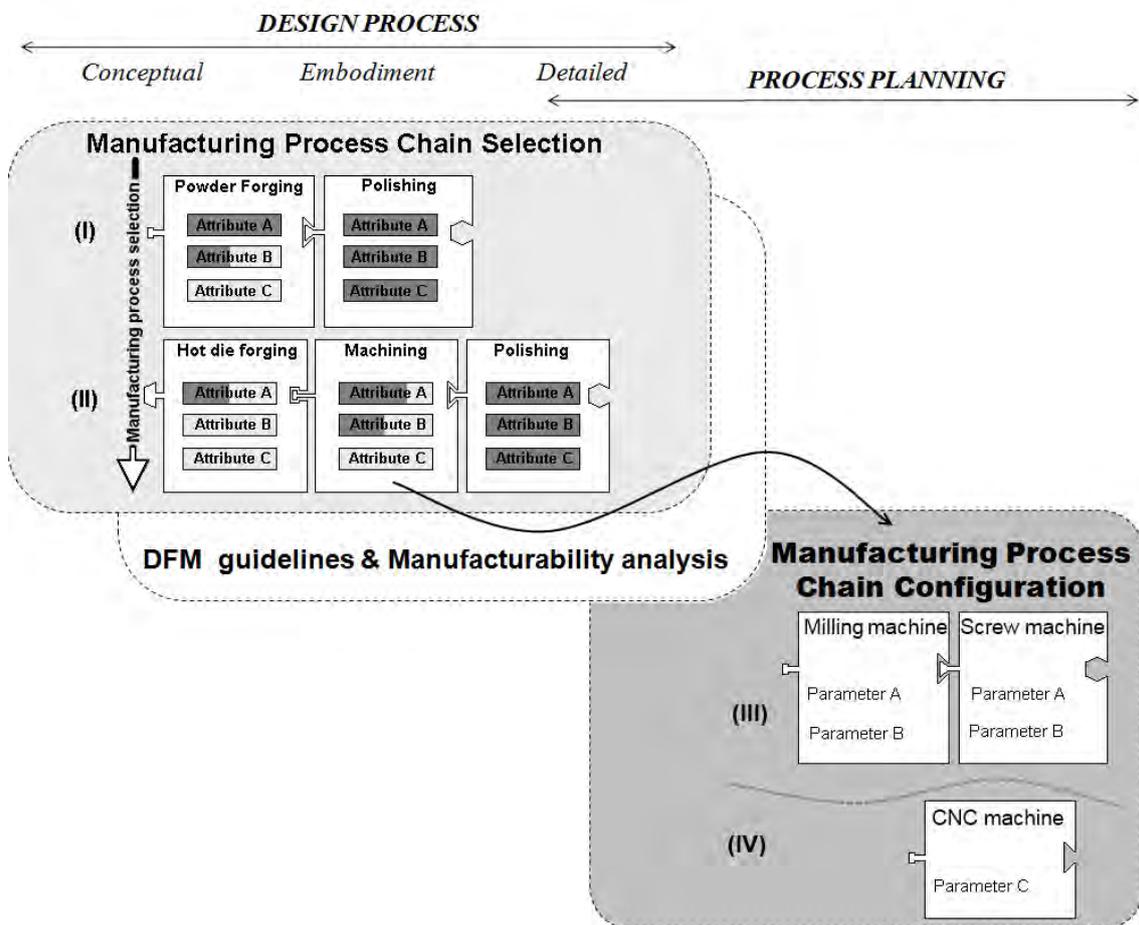


Figura 15 – Ámbito de trabajo de las cadenas de procesos de fabricación.

La configuración de la cadena de procesos de fabricación es utilizada por Denkena (Denkena et al., 2007) para definir los pasos a seguir que llevan un diseño a su producción en planta, es decir para establecer la planificación a la fabricación.

Para Denkena durante la configuración se determinan tanto las máquinas y las herramientas, como los parámetros y restricciones de fabricación para un entorno concreto. Por lo tanto, la configuración se lleva a cabo a nivel de planificación del proceso. En la Figura 15 se muestran dos ejemplos de configuración con las etiquetas (III) y (IV).

Denkena (Denkena et al., 2007) también propone el concepto de la optimización de la cadena de procesos de fabricación en el área de la planificación de la producción. Según Denkena cuando los investigadores hablan de optimización en el área de planificación a la producción, suelen hablar de optimizar un sólo proceso usado en la producción del producto o de la optimización del conjunto de procesos de fabricación pero de forma aislada. No obstante, Denkena considera que para obtener productos más ajustados tanto en calidad como en mayor eficiencia, no se deben ajustar las variables de cada proceso de forma aislada sino que se debe hacer una valoración integral de la cadena de procesos, ya que los procesos de fabricación se influyen entre ellos y comparten parte de las variables. A modo de ejemplo, en el caso de una producción mecánica donde se trabaja la pieza que sale del horno, pasa por la forja y finaliza con un tratamiento superficial, se puede optimizar la influencia de la temperatura a lo largo de la cadena de procesos de fabricación de la siguiente forma. El punto clave es que el tratamiento superficial demanda trabajar con una temperatura de pieza de 800 °C. Al estudiar la cadena de procesos de fabricación de forma integral se descubre que a la salida del horno, la pieza está a 1300° C, luego la forja reduce 200 °C la temperatura de la pieza y finalmente el transporte entre procesos enfría la pieza 15 °C más. Con todo este recorrido la pieza llega al proceso de tratamiento térmico a una temperatura de 1085 °C implicando que se debe enfriar la pieza hasta 800 °C. Teniendo en cuenta que el proceso de forja se ve influido por la variable temperatura, cuando la temperatura es demasiado baja se aumenta la abrasión mecánica y cuando es alta se produce la abrasión térmica haciendo reducir el tiempo de vida de la matriz de forja. Al Aplicar el método de optimización de las cadenas de procesos de fabricación ideado por Denkena se obtienen que la temperatura óptima de entrada al proceso de forja debería ser de 1088°C (Denkena et al., 2007; Denkena et al., 2006).

Denkena (Denkena et al., 2007; Denkena et al., 2006) ha concretado la optimización de las cadenas de procesos de fabricación en el desarrollo del método *DTI-method (Dimensioning Technological Interfaces)*. El *DTI-method* realiza una planificación integral basada en un modelo genérico de proceso, simulación discreta y optimización multi-criterio. Lo que se llega a optimizar, tal y como se ha visto en el ejemplo de la temperatura de la pieza de forja, las interfaces tecnológicas. Entendiendo las interfaces tecnológicas como la totalidad de las variables que circulan entre dos procesos.

2.3 Planificación del proceso de fabricación

La planificación de la fabricación es la actividad donde se programan todas las tareas de fabricación necesarias para convertir el diseño en el producto final. Estas tareas de fabricación se complementan con información detallada sobre los parámetros de los procesos de fabricación. Por ejemplo en el caso de procesos de mecanizado, las tareas están definidas por los siguientes parámetros: las máquinas utilizadas, las herramientas utilizadas o las condiciones de corte indicadas para realizar la tarea.

En la planificación de la fabricación se ordenan las tareas, que realizará cada proceso de fabricación, en una secuencia que permitirá obtener el producto final. Esta secuencia se conoce como hoja de ruta. Cada producto a fabricar puede disponer no únicamente de una sola hoja de ruta sino de un conjunto de hojas alternativas.

Al planificar la fabricación de cada uno de los productos con un conjunto de hojas de ruta, se obtiene una mayor flexibilidad en la planificación de la producción. Esta flexibilidad proviene de tener alternativas de fabricación para reducir los cuellos de botella encontrados durante la planificación de la producción debido a la utilización mayoritariamente de los mismo recursos productivos (Blanch et al., 2011).

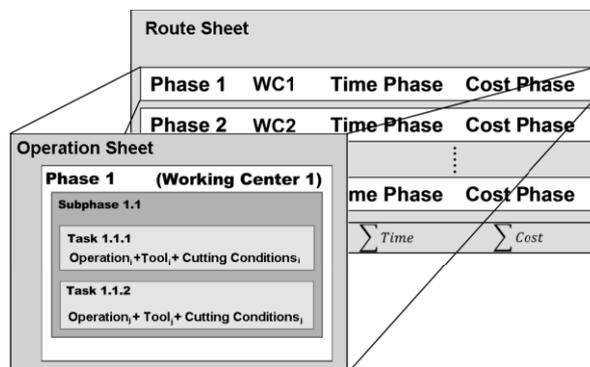


Figura 16 – Estructura general de una hoja de ruta y su detalle de una fase.

Los sistemas CAPP ayudan al ingeniero de fabricación en el desarrollo de estas hojas de ruta. Estos sistemas CAPP han evolucionado desde los manuales a las aproximaciones generativas. El enfoque manual significa examinar el plano del producto y desarrollar la planificación de la fabricación con el uso de operaciones estandarizadas (Alting y Zhang, 1989). Por su parte el enfoque generativo establece de forma automática una planificación de la fabricación para el producto (Kryssanov et al., 1998).

Existen varios trabajos de investigación que tratan de encontrar y proponer soluciones para facilitar la tarea de la planificación de la fabricación, entre ellos, Ciurana (Ciurana et al., 2008) donde se define un modelo de actividades global que estructura una herramienta integrada para ayudar en el proceso y la planificación de la producción. Una de las actividades definidas en el modelo de Ciurana estructura como calcular la operación de corte y su tiempo. Blanch (Blanch et al., 2011; Blanch et al., 2008) concibe y desarrolla una aplicación informática para la creación y gestión de hojas de ruta, en un entorno de pequeña y mediana empresa (PYME) del sector de mecanizados. Esta aplicación informática, basada en el trabajo citado de Ciurana, ayuda a definir las tareas necesarias para la fabricación, las relaciones entre ellas y establecer sus tiempos y costes.

2.4 Sistemas CAD y la integración con la selección de procesos

Considerando el entorno de ingeniería concurrente en el que se desarrollan actualmente los productos, se precisa que las diferentes herramientas que asisten al diseño estén interconectadas para dar respuestas más adecuadas a las diferentes preguntas planteadas en el diseño de un nuevo producto.

Si nos centramos en las herramientas que integran la fabricación en el proceso de diseño hay que remarcar el desarrollo de los sistemas CAM y CAPP. En la integración de los sistemas CAD-CAM y CAD-CAPP, el modelo geométrico tiene que ser analizado para poder interpretarlo desde el punto de vista de la fabricación. Con el objetivo final de poder asignar de forma automática las operaciones, herramientas, rango de los parámetros de proceso y demás aspectos relacionados con la planificación y fabricación. Para ello el reconocimiento de las características geométricas constituye un punto de partida útil para el cumplimiento de este análisis (Jones et al., 2004). Se han desarrollado diferentes procedimientos que permiten identificar las características geométricas dentro de los modelos CAD, entre los cuales se destacan: algoritmos de reconocimiento de características geométricas, diseño por características e identificación interactiva de características (Marchetta y Forradellas, 2010). Ya que los sistemas CAD manipulan la información geométrica requerida, mediante la creación y el almacenamiento de vértices, aristas y caras, y no reconocen información relacionada con la fabricación. Por tanto la identificación de las 1000s características geométricas proporciona un vínculo entre los sistemas CAD y CAM en un entorno de fabricación automática (Senthil kumar et al., 1996). En la Figura 17 se representa de forma extensa este vínculo entre CAD y CAM.

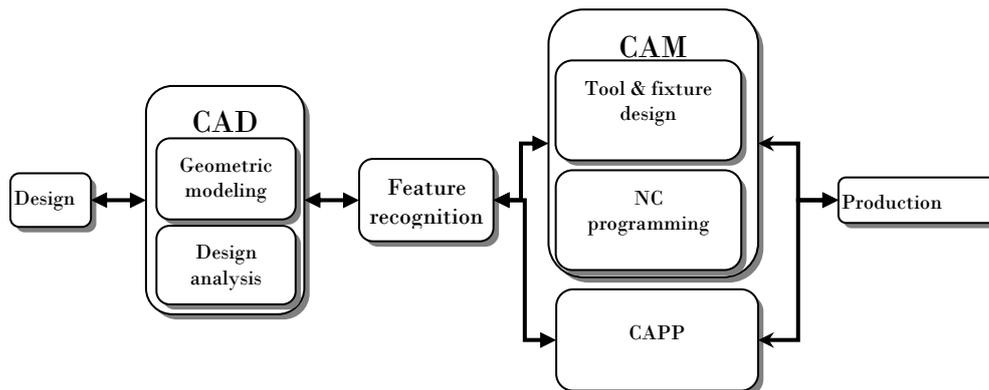


Figura 17 – Circulación de la información para un entorno de fabricación automática, fuente: (Senthil kumar et al., 1996).

La selección de procesos de fabricación se realiza durante la fase de diseño y requiere de información geométrica (de forma y de características) por lo tanto se podría pensar en que la integración de las herramientas de selección con los sistemas CAD está resuelta. No obstante, como se verá a lo largo de este apartado, las herramientas de selección tienen muy poca vinculación con los sistemas CAD.

2.4.1 Reconocimiento de la información geométrica en los sistemas CAD

En la literatura se establecen tres procedimientos diferentes que permiten identificar las características geométricas dentro de los modelos CAD: algoritmos de reconocimiento de características geométricas, diseño por características e identificación interactiva de características (Marchetta y Forradellas, 2010).

2.4.1.1 Reconocimiento de características geométricas

Las técnicas de reconocimiento de características geométricas son un proceso de reinterpretación de un modelo CAD para identificar las actividades de fabricación hasta llegar a generar el código CNC (Verma y Rajotia, 2010; Hayasi y Asiabanpour, 2009; Başak y Gülesin, 2004). Estas técnicas se agrupan en cuatro grandes grupos: coincidencia de patrones en grafos, descomposición en volúmenes, razonamiento basado en pistas y modelos híbridos (Marchetta y Forradellas, 2010; Gutiérrez Rubert, 2007).

- a) La técnica de *coincidencia de patrones en grafos* consiste en buscar patrones de características en modelos CAD construidos por medio de *BReps* (modelos de fronteras) (Han et al., 2000). En primer lugar se transformará el modelo CAD en un grafo donde las caras están representada como nodos y las aristas, entre las diferentes caras, están representadas por arcos. Una vez construido el grafo del modelo CAD,

se explora para encontrar sub-grafos que se ajusten a las diversas características geométricas también expresadas con un grafo (Verma y Rajotia, 2010; Han et al., 2000). A modo de ejemplo en la Figura 18(a) se ha representado una ranura y al lado su representación a través de un grafo. Los algoritmos que desarrollan esta técnica se enfrentan a un problema de isomorfismo de los subgrafos, clasificado como NP-completo, haciéndolo de complejidad computacional alta. Sin embargo, las plantillas de características geométricas son de un número reducido de nodos (véase los ejemplos de la Figura 19), de forma que el problema a resolver se convierte en un problema polinomial y por lo tanto tratable desde el punto de vista computacional (Han et al., 2000).

La técnica de coincidencia de patrones en grafos es capaz de localizar características geométricas aisladas, como ejemplo en la Figura 18(a). Pero en cuanto una característica geométrica es alterada o combinada con otra, esta técnica no detectará la combinación como una entidad sino que interpretará cada sección resultante por separado. Prosiguiendo el ejemplo, si se altera la ranura Figura 18(a) con una ranura perpendicular Figura 18(b) el grafo resultante ya no tiene tres nodos, tal y como se define una la ranura en Figura 19, sino que tiene cuatro. Al tener cuatro nodos dentro del grafo resultante, esta técnica identifica dos ranuras Figura 18(c) en vez de una sola. Además también puede suceder que las características identificadas a través de esta técnica tengan algún problema de accesibilidad a la hora de ser fabricadas por los procesos de fabricación (ej. Figura 20).

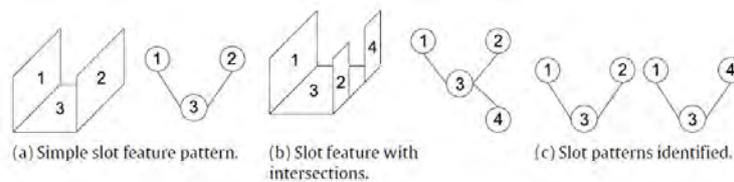


Figura 18 – Limitaciones del método basado en grafos, fuente: (Marchetta y Forradellas, 2010).

Features	AAG	Example
Step		
Slot		
Blind step		
Blind slot		
Packet		
Blind hole		
Chamfer		

Figura 19 – Sub-grafos de diversas características geométricas fuente: (Senthil kumar et al., 1996).

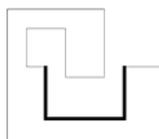


Figura 20 – Ranura identificada pero no válida para su fabricación, fuente: (Han, 1996).

b) La técnica de *descomposición en volúmenes* consiste en reducir el modelo geométrico en un conjunto de pequeños volúmenes (llamados volúmenes delta) y manipularlos con el fin de identificar las características geométricas (Verma y Rajotia, 2010). Para la descomposición en volúmenes delta existen dos aproximaciones: descomposición mediante envolventes convexas y descomposición basada en celdas.

- La *descomposición mediante envolventes convexas* se basa en descomponer la pieza en poliedros convexas mediante operaciones booleanas (suma y sustracción). En la Figura 21 se muestra el árbol de operaciones para obtener la pieza P_0 .

Aunque esta técnica de descomposición es interesante, desde el punto de vista de geometría computacional, conlleva dos principales inconvenientes. Uno es la limitación de trabajar exclusivamente con piezas formadas por caras planas, pues así lo requieren los algoritmos previos desarrollados para obtener el envolvente convexo mínimo que rodea a un sólido. Y la otra limitación proviene de la detección de volúmenes no equivalentes a operaciones de mecanizado válidas. En la Figura 22(a) se muestra el resultado de una descomposición no

fabricable por mecanizado, mientras que en la Figura 22(b) se muestra una que sí que lo es (Gutiérrez Rubert, 2007; Han et al., 2000).

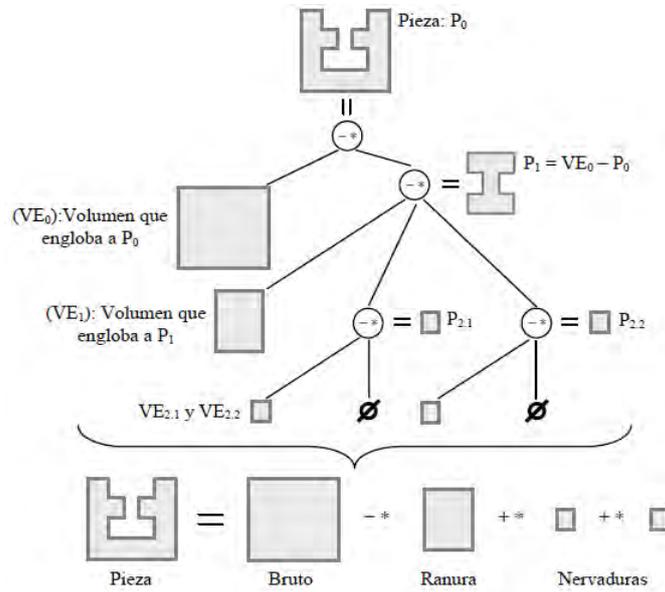


Figura 21 – Ejemplo de descomposición en envoltas exteriores convexas, fuente: (Gutiérrez Rubert, 2007).

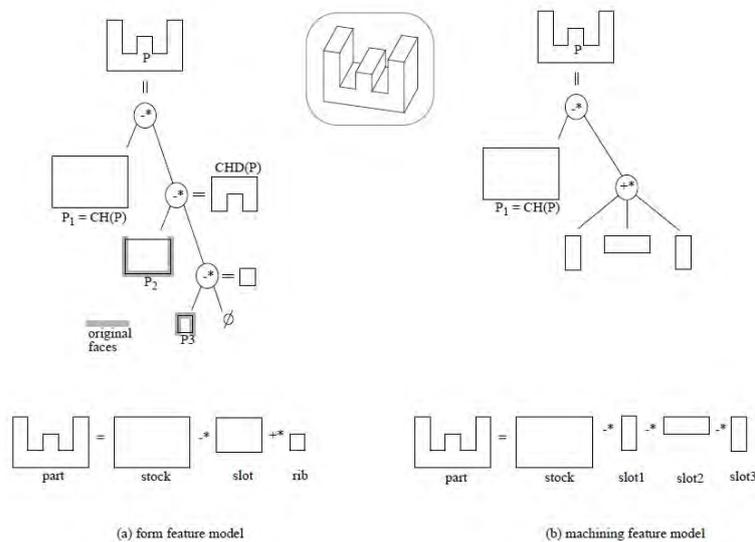


Figura 22 – (a) resultado calculado por descomposición mediante envolventes convexas (b) forma de fabricación, fuente: (Han, 1996).

- La *descomposición basada en celdas* se fundamenta en la descomposición del modelo en celdas que se irán uniendo en volúmenes y a su vez estos volúmenes serán clasificados en características geométricas. La Figura 23 muestra la pieza de

partida (a), su correspondiente descomposición en celdas (b) y el conjunto de características detectadas (c).

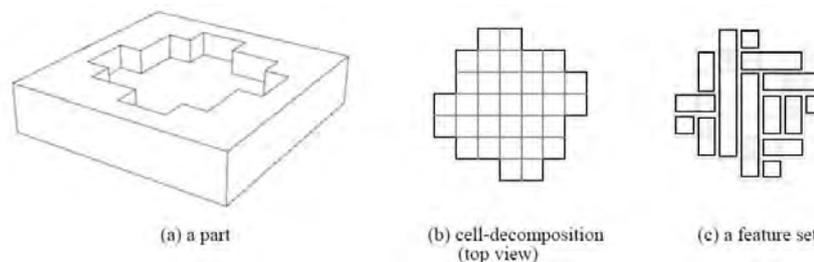


Figura 23 – Comportamiento del método Cell Decomposition, fuente: (Han, 1996).

Esta técnica permite diferentes asociaciones de celdas, dando lugar a múltiples soluciones. Esta característica de asociación múltiple permite tratar el efecto de interacción entre características geométricas. No obstante en este enfoque aparecen algunas dificultades tanto en la fase de descomposición como en la de composición (Verma y Rajotia, 2010; Han et al., 2000). En cuanto a la fase de descomposición, se puede generar un gran volumen de celdas para poder tratar áreas localizadas. Mientras que la complejidad de la fase de composición suele ser exponencial y por lo tanto será necesario la incorporación de métodos heurísticos para descartar composiciones de celdas que no llegarán a solución (Gutiérrez Rubert, 2007).

- c) La técnica de *razonamiento basado en pistas* busca en los modelos CAD alguna pista, ya sea en superficie, eje, relación de vecindad, disposición entre superficies, etc. que lleve a pensar que se está ante una característica geométrica. Con lo que es más flexible que los métodos basados en búsqueda por coincidencias con patrones, donde pequeñas diferencias impiden el reconocimiento. Un ejemplo de pista podría ser encontrar una superficie cilíndrica cerrada, la cual podría indicar la presencia de un posible agujero. Este rastro proporciona un indicio fiable de la existencia potencial de una característica geométrica, incluso cuando las características se cruzan. Otro ejemplo (Figura 24), sería encontrar un par de caras opuestas en paralelo, lo cual sugiere la presencia de una ranura. El principal problema es definir los rastros que lleven a detectar todos los posibles casos y a discernir entre ellos (Gutiérrez Rubert, 2007; Han, 1996).

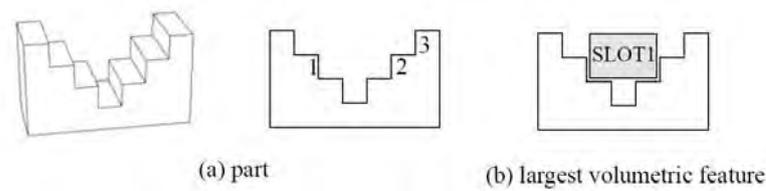


Figura 24 – Comportamiento del método hint-based, fuente: (Han, 1996).

- d) En último lugar, las *técnicas híbridas* son un conglomerado de técnicas que combinan las técnicas anteriores para solventar los inconvenientes mencionados. En Marchetta se citan diversos ejemplos (Marchetta y Forradellas, 2010).

2.4.1.2 Diseño por características

El diseño por características propone definir un producto mediante características de diseño (Liou, 3w). El diseño por características se puede asimilar como una extensión de la geometría construida por sólidos (CSG) (Spitz y Rappoport, 2004; Naing, 2003). Porque el CSG se basa en combinar sólidos simples tales como cubos, cilindros y esferas con operaciones booleanas como uniones, diferencias e intersecciones para crear el modelo 3D. Pero en el caso del diseño por características, los sólidos simples son reemplazados por las características geométricas. Las características de diseño se definen como formas geométricas con una funcionalidad y son paramétricas. Al insertar en el modelo una nueva característica ésta crea una nueva geometría o modifica una característica previa, las posteriores manipulaciones sobre el modelo se representan como un árbol de características (Başak y Gülesin, 2004; Spitz y Rappoport, 2004).

El diseño por características es una alternativa a los algoritmos de reconocimiento de características geométricas, en términos de interoperabilidad entre aplicaciones (CAD, CAM, CAPP). Debido a que los sistemas CAD tratan los modelos del producto como un conjunto de líneas, círculos, arcos, etc. sin ninguna correspondencia con el significado que representan a priori. Si se parte desde esta información de bajo nivel del modelo CAD habrá la necesidad de añadir en el enlace CAD-CAM o CAD-CAPP algoritmos de reconocimiento de características geométricas con los que se determinarán las características geométricas. En el caso de utilizar el diseño por características para la interoperabilidad entre aplicaciones, al tenerlas ya identificadas únicamente se deberá reconstruir el árbol de características geométricas de la aplicación saliente a la aplicación destino. Hay que mencionar que la posibilidad de diseñar por características paramétricas ya está contemplada en los sistemas CAD actuales (Spitz y Rappoport, 2004).

2.4.1.3 Identificación interactiva de características

Los algoritmos que implementan esta modalidad de identificación almacenan únicamente la información geométrica seleccionada e identificada por el usuario. El usuario especifica la información geométrica y le asigna la característica geométrica que le corresponde, de forma que cada bloque de información seleccionado equivale a una característica geométrica. Con esta forma de trabajar no es necesario desarrollar ningún sistema o algoritmo para la identificación de las características geométricas sobre el modelo, pero esto no excluye que se capte otro tipo de información geométrica del propio modelo CAD (Başak y Gülesin, 2004).

2.4.2 Herramientas que asisten al proceso de diseño y la integración con los sistemas CAD

En los últimos tiempos se han ido desarrollando una amplia variedad de herramientas que asisten al proceso de diseño sobre aspectos relacionados con la fabricación, montaje, reciclado, etc. Considerando que actualmente la mayoría de diseños se desarrollan con sistemas CAD resulta interesante analizar el estado de integración entre dichas herramientas con los sistemas CAD.

Según Hayasi (Hayasi y Asiabanpour, 2009) las herramientas complementarias de ayuda al desarrollo del proceso de diseño tienen diversos grados de integración con los sistemas CAD, aunque desde una perspectiva general se pueden clasificar en: independientes o dependientes a un sistema CAD particular.

- Las *herramientas dependientes* son aquellas que están integradas en el sistema CAD y trabajan conjuntamente durante la ejecución del mismo. Esta integración se construye mediante las APIs de programación (*Application Programming Interfaces*) que permiten leer y manipular la información almacenada dentro de las estructuras de programación del CAD. Esta forma de trabajar permite un fácil acceso a toda la información contenida en el modelo de dibujo, de forma que las entradas de la herramienta se pueden extraer directamente del modelo CAD. No obstante, estas herramientas, a menudo quedan restringidas al uso de una única plataforma CAD (Hayasi y Asiabanpour, 2009).
- Las *herramientas independientes* son aquellas que no están integradas dentro de un sistema CAD y trabajan de forma independiente. De este modo el acceso a la información del modelo CAD que puede precisar la herramienta para su ejecución se puede obtener de dos formas diferentes.

La primera de ellas es mediante el uso de archivos neutros en formatos como IGES o STEP, pero asumiendo el riesgo de perder parte de la información contenida en el modelo (Hayasi y Asiabanpour, 2009). Mientras que la segunda forma consiste en la introducción manual por parte del usuario, asumiendo que hay que dedicar un tiempo adicional para ello y una pérdida de retroalimentación de información entre el modelo y la herramienta.

La vinculación de los sistemas CAD y herramientas de ayuda al diseño para seleccionar procesos está muy poco consolidada, de forma que la mayoría de ellas se pueden considerar independientes. No obstante la Tabla 2 resume el grado de vinculación entre las diversas herramientas de selección independientes presentadas en la sección 2.1.3 y los sistemas CAD.

<i>Herramienta / algoritmo de selección</i>	<i>Observaciones</i>
<i>CES Selector</i> (Esawi y Ashby, 2000; Lovatt, 1998)	Requiere una introducción manual de los datos a utilizar.
<i>MAMPS</i> (Giachetti, 1998)	Requiere una introducción manual de los datos a utilizar.
<i>WebMCSS</i> (Zha, 2005)	Requiere una introducción manual de los datos a utilizar.
<i>WiSeProM</i> (Gupta et al., 2003)	Requiere una introducción manual de los datos a utilizar.
<i>MAS</i> (Smith et al., 2003)	Requiere una introducción manual de los datos a utilizar.
<i>DFM_Peaux_Squelettes</i> (Skander et al., 2008; Skander, 2006)	Utiliza archivo de texto para almacenar las características geométricas que después serán traducidas a una imagen 3D por medio de una biblioteca gráfica.
<i>Conceptual Process Planning System (CPP)</i> (Feng et al., 1999; Feng y Zhang, 1999; Nederbragt et al., 1998)	Visualiza el modelo CAD a partir de importar el modelo de un archivo neutro.
<i>Sistema de agentes creado por Feng</i> (Feng et al., 2005)	Crea un agente para comunicarse con un sistema CAD y extrae la información del modelo CAD.

Tabla 2 – Lista de herramientas de selección con respecto a su relación con los sistemas CAD.

2.5 Diseño para la fabricación (DFM) y análisis de la fabricabilidad

El diseño para la fabricación se encuadra dentro de la idea de disponer de una guía de sugerencias sobre algún punto clave del ciclo de vida del producto (como ejemplos: test, mantenimiento, medio ambiente o reciclado entre otros) durante el diseño. Todas estas guías de diseño se agrupan bajo el término ‘Design for X (DFX)’ como forma general o determinando la X con lo cual se hace una particularización (Herrmann et al., 2004). En este apartado se ha particularizado la X del DFX como diseño para la fabricación donde se alberga los aspectos de fabricación (Swift y Booker, 2003).

Con respecto a los diferentes trabajos alrededor del DFM realizados por los investigadores, se pueden clasificar en dos grupos: recomendaciones de DFM y análisis de la fabricabilidad (Ferrer, 2007).

- El grupo de las *recomendaciones de DFM* incluye todas aquellas propiedades y limitaciones de los procesos de fabricación que pueden tener incidencia o relevancia sobre el diseño, y que por ello tienen que ser consideradas en el diseño para poder fabricar con esos procesos de fabricación. Estas recomendaciones pueden estar relacionadas con la forma, la calidad de la pieza, los materiales o con otros requerimientos del producto (Ferrer, 2007).

Con la ayuda de estas guías, a los equipos de diseño les permiten tener tanto un conjunto de pautas que les permiten prevenir los errores básicos, ya que son normas de buenas prácticas, como también diseñar piezas que pueden ser fabricadas con mayor facilidad y menor coste (Petrovic, 2008; Ferrer, 2007).

Ejemplos de recomendaciones de DFM se pueden encontrar en literatura especializada como son los casos de (Swift y Booker, 2003; Bralla, 1999), en la literatura general de los procesos de fabricación como son los casos de (Kalpakjian, 2006; Groover, 1996), y con el auge de Internet también hay disponibles webs de recomendaciones de DFM como es el caso de (NDP-solutions, 3w).

- El grupo del *análisis de la fabricabilidad* incluye el conjunto de métodos que deben determinar si el diseño es o no fabricable para un proceso dado. Estos métodos sistematizan las recomendaciones de diseño haciendo que los equipos de diseño se centren en los aspectos

creativos más que en memorizar estas recomendaciones (Gupta et al., 1997).

Las herramientas derivadas de este grupo son mayoritariamente herramientas informáticas que se han creado tanto para el análisis en procesos concretos (Brown y Wright, 1998; Ishii et al., 1991) como para el análisis más generalizados (Boothroyd et al., 2002) y algunos de ellos se centran en hacer una estimación del coste del producto (Swift y Booker, 2003).

Resumiendo este apartado se podría decir que las recomendaciones de DFM son utilizadas por los equipos de diseño para incorporar información de procesos de fabricación en los diseños, mientras que el análisis de fabricabilidad se basa en las recomendaciones de DFM y es utilizado para evaluar las decisiones de fabricación tomadas (Ferrer, 2007).

2.6 Establecimiento del problema

Una vez realizado el análisis detallado del estado del arte relacionado con la confección de cadenas de procesos de fabricación y tras haber establecido los cimientos para el desarrollo de esta tesis, en este apartado se resumen los diferentes puntos más relevantes de la problemática detectada en este campo de investigación.

- El proceso de fabricación debe considerarse lo antes posible en el proceso de diseño, ya que los errores que pueden aparecer durante la fabricación pueden incrementar el coste, el tiempo de desarrollo y la calidad del mismo. Por este motivo es importante que a lo largo del desarrollo del diseño ya se empiecen a determinar los posibles procesos o secuencia de ellos que podrán fabricar el diseño.
- Considerando la gran complejidad del proceso de diseño junto con la amplia variedad de procesos de fabricación que existen, ya sean tradicionales o novedosos, y la gran cantidad de información y conocimiento asociado a cada uno de ellos, resulta bastante necesario proporcionar a los ingenieros de diseño o de fabricación herramientas que les asesoren y les asistan en la elección de la cadena de procesos.
- Las herramientas que existen actualmente y que se pueden usar con este fin son las herramientas de selección de procesos, no obstante para seleccionar cadenas de procesos presentan las siguientes limitaciones:

- La mayoría de las herramientas de selección de procesos utilizan la estrategia de búsqueda libre como principio de funcionamiento. Como se ha visto en la sección 2.1.2 esta estrategia se basa en el uso de atributos cuantitativos, como “peso”, “dimensiones” o “material”, para la comparación entre la información de diseño introducida en la herramienta y la información de los procesos de fabricación almacenada en ella. No obstante, en dichas herramientas todos los atributos tienen la misma importancia y deben ser conseguidos por un mismo proceso de fabricación, para que éste pueda considerarse como viable. Ya que la finalidad de estas herramientas es mostrar aquellos procesos de fabricación que sean capaces de realizar todos los atributos a la vez.
 - Comparando este proceder con la realidad, se constata que existen ciertos atributos que pueden ser conseguidos de forma gradual por diferentes procesos de fabricación, es decir por medio de una cadena de procesos. De forma que, para seleccionar cadenas de procesos de fabricación es necesario implantar una jerarquía de importancia para establecer el grado de cumplimiento de un atributo concreto con respecto a los procesos de fabricación. Con esta jerarquía se aligera la restricción de obtener los atributos al cien por cien en cada una de las etapas de la cadena y se permite que algunos atributos de diseño se pueden fabricar en diferentes etapas de la cadena. Lo cual significa que se pueden obtener de forma parcial en los primeros procesos y de forma finalizada en el último.
 - En la confección de cadenas se precisa establecer relaciones de secuencia entre los procesos de fabricación. Por el hecho que un proceso de fabricación es la entrada del subsiguiente proceso y no todas las combinaciones de procesos resultan tecnológicamente viables.
 - Considerando la amplia variedad de procesos de fabricación existentes resulta importante clasificarlos de algún modo que se reduzca el árbol de soluciones posibles en cada nivel de discriminación. Por este motivo la clasificación de procesos propuesta de Schercliff (Lovatt y Shercliff, 1998b), que determina el grado de obtención de la forma para cada proceso de fabricación, puede resultar bastante efectiva en la selección de cadenas de procesos.
- Las herramientas de selección de procesos de fabricación y de cadenas deberían estar vinculadas o integradas con el diseño a través del modelo CAD por tres principales razones. La primera de ellas es que tanto los sistemas

CAD como las herramientas de selección se deben usar desde las fases iniciales del diseño para garantizar el éxito del diseño final. La segunda es que el diseño evoluciona y cambia, de forma que las herramientas de selección deben ser capaces de ir incorporando estos nuevos cambios y adaptar la cadena acorde con los mismos. Y finalmente, integrando la herramienta de selección en el sistema CAD se dispone de toda la información albergada en el modelo CAD, haciendo más evidente la influencia que ejerce la “forma” del modelo en la selección y al mismo tiempo permitiendo un análisis de la “forma” más profundo. No obstante esta vinculación se enfrenta a los siguientes problemas:

- Para seleccionar cadenas de procesos es muy importante conocer la forma del diseño lo más aproximadamente posible, así como también sus dimensiones asociadas. Para poder realizar esta tarea dentro de los sistemas CAD y trabajar directamente con la geometría del modelo, los procedimientos de reconocimiento geométrico pueden resultar una buena solución. No obstante, es un complejo tema de investigación donde todavía se está trabajando en la obtención de mejores resultados. Como se ha visto en el estado del arte, los algoritmos de reconocimiento de características geométricas están destinados a realizar una lectura desde cero del modelo y localizar porciones de forma con significado propio (*features*). A su vez, el diseño por características (*features*) puede aligerar el proceso de reinterpretación del modelo pero aun así obtener una descripción analítica de la forma continua siendo complejo.
- Por otro lado, utilizar clasificaciones genéricas de la forma, como las que se ha mostrado en la sección 2.1.2.4, aunque pueda resultar válido para una primera selección de procesos, resulta poco preciso cuando se pretende obtener la cadena en su totalidad. El ingeniero establece el valor del atributo “forma” mediante la similitud del boceto con los ejemplos gráficos propuestos por la clasificación, quedando a merced de la subjetividad o pericia del ingeniero a la hora de clasificar la forma dentro de una clase en concreto; ya que no existe más ayuda que la gráfica. Consecuentemente es necesario plantear algún otro método de reconocer la forma, que aunque no sea tan preciso como el reconocimiento geométrico, pueda ser también válido para generar cadenas de procesos. En este sentido, utilizar como base el diseño por características puede resultar una buena opción.
- Una herramienta de selección integrada en los sistemas CAD tiene como principal inconveniente que queda ligada a una única plataforma y a merced de su evolución. Ya sea en obtener una

estabilidad en el mercado, como en las prestaciones que ofrezca la plataforma.

Con la finalidad de colaborar en la resolución de la problemática planteada, en esta tesis se ha desarrollado un algoritmo para la obtención de cadenas de procesos de fabricación y se ha implementado de forma integrada en una plataforma CAD comercial existente. Este algoritmo utiliza como base las investigaciones realizadas en la selección de procesos de fabricación, y el sistema implementado se fundamenta sobre el diseño de características como base de integración entre el modelo CAD y la herramienta de selección desarrollada.

Capítulo 3 Fundamentos y estrategia para la derivación de cadenas de procesos de fabricación

En este capítulo se va a exponer el modelo funcional para el algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación en el dominio de piezas mecánicas. Mediante el uso de la metodología IDEF se desarrolla la propuesta del modelo funcional, donde se expondrán las diversas funciones que debe llevar a cabo el algoritmo para conseguir obtener una cadena de procesos de fabricación a partir del modelo CAD de un producto.

Antes de realizar la exposición del modelo funcional, se expondrá el conjunto de elementos implicados en el desarrollo del proceso de derivación y que conforman los fundamentos del algoritmo desarrollado.

3.1 Fundamentos básicos del modelo

Una cadena de procesos de fabricación determina el camino, con diferentes procesos de fabricación, necesario para lograr la transformación del bruto de partida en la pieza final deseada. En la obtención de dichas cadenas interviene información de diseño e información de fabricación (Figura 25). El conjunto de ambas informaciones es comparada mediante el *método de derivación de cadenas de procesos de fabricación*, el cual será el alma del algoritmo aquí propuesto.

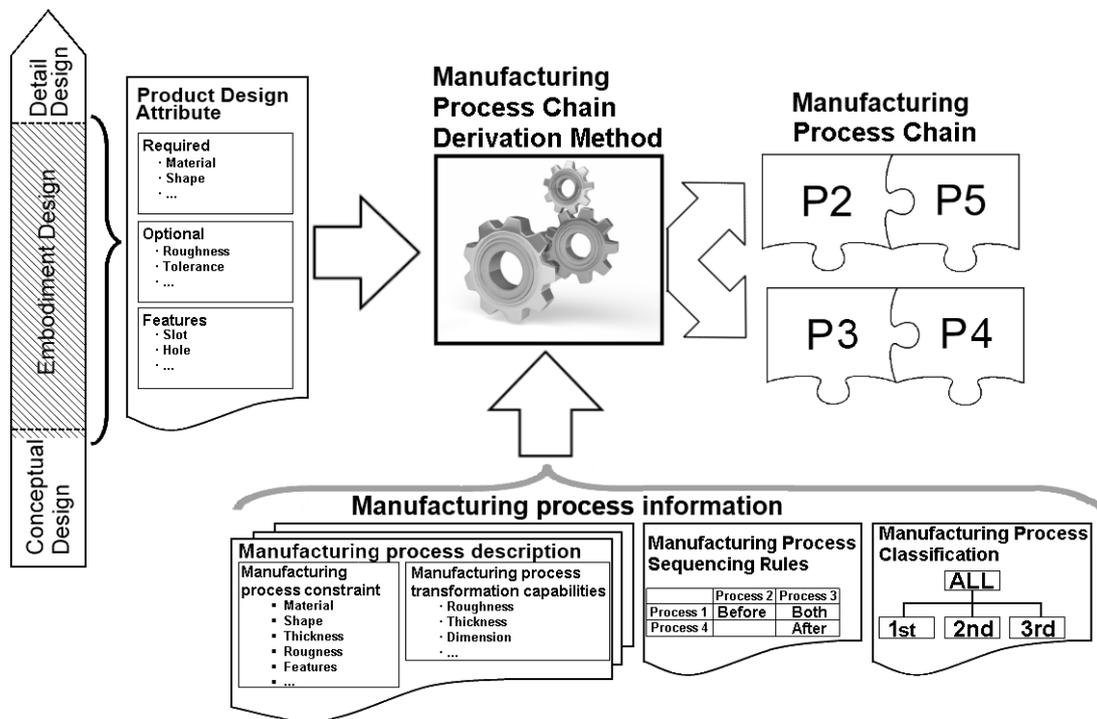


Figura 25 – Contexto de desarrollo del método de derivación de cadenas de procesos de fabricación.

Como se muestra en la Figura 25, la cadena de procesos de fabricación se debe empezar a considerar durante la fase de materialización (Zha, 2005; Shercliff y Lovatt, 2001), donde los requerimientos, las funcionalidades y un primer boceto del producto están definidos. La información de diseño del producto se debe compilar en forma de atributos de diseño, los cuales representan una descripción cuantitativa del diseño propuesto. En esta tesis se ha tomado como referencia los atributos de diseño propuestos en la selección de procesos basada en atributos (Gupta et al., 2003; Smith et al., 2003; Giachetti, 1998), sin embargo su utilización ha sido tratada desde un enfoque diferente. Los atributos de diseño se clasifican en tres grupos diferentes

dependiendo del grado de necesidad de ser obtenidos por los procesos de fabricación que integran la cadena. Estos grupos son: atributos requeridos, opcionales y características geométricas. Los *atributos de diseño requeridos* son todos aquellos que todos los procesos de fabricación incluidos en la cadena de procesos de fabricación tendrán que ser capaces de satisfacer. Los *atributos opcionales* son aquellos en los que se logra obtener su valor de diseño a lo largo de varios procesos de fabricación, por lo tanto será la totalidad de la cadena de procesos de fabricación quien deberá garantizar su realización. Las *características geométricas* son porciones de la forma de la pieza que tienen una funcionalidad específica.

Por otro lado, para poder elaborar las cadenas de procesos de fabricación se dispone también de la información de dichos procesos y en especial de su capacidad para modificar una pieza según los atributos de diseño. Sin embargo hay que tener en cuenta que esta información de los procesos de fabricación ha de ser comparable con la información de diseño extraída por medio de los atributos de diseño, para así proporcionar cadenas de procesos de fabricación viables desde el punto de vista técnico.

La información de los procesos de fabricación que se ha considerado en el método de derivación ha sido dividida en tres partes (Figura 25): descripción del proceso de fabricación, las reglas de secuencia de los procesos de fabricación y la clasificación de los procesos de fabricación. A continuación se explican con detalle cada una de ellas:

- La primera parte es la *descripción de los procesos de fabricación*, la cual alberga las limitaciones en los atributos de diseño del producto que un proceso en particular le proporciona. Esta información se ha dividido entre restricciones de los procesos de fabricación y capacidades de transformación de los procesos de fabricación.
 - Las *restricciones de los procesos de fabricación* están constituidas por los atributos que describen los procesos de fabricación y sus límites para fabricar los atributos de diseño del producto. Estas restricciones están basadas en la propuesta de Lovatt and Shercliff (Lovatt y Shercliff, 1998b) y permiten hacer comparaciones directas y objetivas de los procesos con el producto. Entre ellas se incluyen atributos relacionados con el material, la forma, las dimensiones geométricas, la rugosidad, características geométricas y ratios de producción. La información sobre estas restricciones de proceso se obtiene del conocimiento de expertos almacenado en libros, manuales y guías (Kalpakjian, 2006; Swift y Booker, 2003; Boothroyd et al., 2002; Davis y American Society for Metals, 1990).

- Las *capacidades de transformación de los procesos de fabricación* representan la capacidad de modificar los atributos de diseño del producto desde un estado inicial o la capacidad para modificar los atributos de diseño del producto que ya han sido modificados por un proceso de fabricación previo. Estas capacidades son definidas por el valor máximo de transformación y se obtienen de las mismas fuentes que las restricciones.
- La segunda parte está constituida por las *reglas de secuencia* de los procesos de fabricación. Estas reglas definen las combinaciones posibles entre los procesos de fabricación que permitirán distinguir entre cadenas de procesos de fabricación viables de las que no lo son. Ya que técnicamente no todas las combinaciones de procesos de fabricación son adecuadas (Shercliff y Lovatt, 2001). Por lo tanto establecer la compatibilidad entre dos procesos garantiza la viabilidad tecnológica de la cadena de procesos de fabricación. Por eso, para cada proceso de fabricación hay que especificar los procesos predecesores, sucesores y los que pueden optar a ambas condiciones.

Los *procesos predecesores* son aquellos que sólo pueden llevarse a cabo antes de un determinado proceso. Poniendo de referencia al proceso de ‘fresado’ (Figura 26), sus predecesores (el conjunto “*before*”) serán los procesos de ‘pulvimetalurgia’ y ‘fundición’. Los *procesos sucesores* son aquellos que sólo pueden llevarse a cabo después de un determinado proceso. En el mismo ejemplo de la Figura 26, los sucesores (el conjunto “*after*”) lo forma únicamente el proceso de ‘pulido’. Finalmente hay una serie de procesos de fabricación en los que es indiferente la posición donde se lleven a cabo con respecto a un proceso determinado. Este conjunto “*both*” de la Figura 26 los muestra para el proceso de ‘fresado’. Con lo cual se podrá realizar primero el proceso de ‘fresado’ seguido del proceso ‘taladrado’ o primero el proceso de ‘taladrado’ seguido del ‘fresado’ y así mismo con el proceso de ‘soldar’ o con el proceso de ‘plegado’.

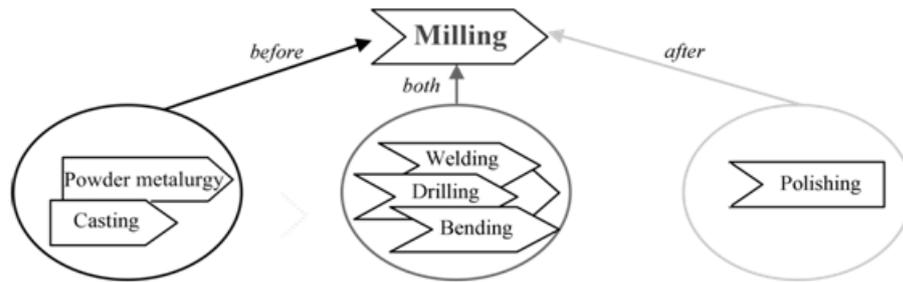


Figura 26 – Ejemplo en forma gráfica de la regla de secuencia para el proceso de fabricación de ‘fresado’.

- La tercera parte incluye la *clasificación* de los procesos de fabricación. Existen diferentes formas de clasificar los procesos que varían en función del objetivo que se pretenda alcanzar con dicha clasificación. En esta tesis se ha adoptado la clasificación de los procesos de fabricación propuesta por Lovatt and Shercliff (Lovatt y Shercliff, 1998b). Esta clasificación ordena los procesos de fabricación en primarios, secundarios o terciarios según el grado en que pueden transformar la forma de la pieza (Lovatt y Shercliff, 1998b). Como apunte de recordatorio, los procesos *primarios* son aquellos que toman el material en bruto, ya sea en líquido, en polvo o en lingotes, y le dan la forma. Los procesos *secundarios* modifican, añaden o refinan las características de la forma anterior. Y por último, los procesos *terciarios* agregan calidad. Esta clasificación no es excluyente, lo cual implica que algunos de los procesos de fabricación podrán ser catalogados en varios niveles de la clasificación, como es el caso del ‘mecanizado’. No obstante, a pesar de ello, el uso de esta clasificación permite reducir el número de procesos de fabricación a analizar en cada eslabón de la cadena de procesos de fabricación.

3.2 Descripción de modelo funcional

En este apartado se presentan las funciones, las actividades y la información para la realización de la derivación de las cadenas de procesos de fabricación. Esta estructuración de la información se ha llevado a cabo mediante la metodología IDEFØ. La metodología IDEFØ es una herramienta de formalización utilizada en diferentes campos y por varios investigadores, en el *anexo A* se expone en detalle esta metodología. A continuación se exponen algunos ejemplos de investigaciones donde se utilizó esta metodología. Estos ejemplos se centran en modelizar diferentes aspectos de la fabricación de producto.

Ciurana (Ciurana et al., 2008) definen un marco para la integración de los procesos de fabricación de arranque de viruta con la planificación de la producción. Romerp (Romero et al., 2008) modelan la cadena de diseño del azulejo de cerámica. Skander (Skander et al., 2008) modelan la información del producto, las limitaciones de fabricación, las relaciones entre el diseño y las reglas requeridas para la implementación de una metodología que integre la selección de procesos de fabricación con las restricciones de la fabricación en el diseño.

La metodología IDEFØ requiere de establecer el punto de vista desde el cual se diseña el modelo de actividades así como también el propósito del mismo. En esta tesis, el propósito establecido es el de esquematizar todas las actividades involucradas en la obtención de cadenas de procesos de fabricación viables para la fabricación de un diseño propuesto. El modelo ha sido desarrollado desde el punto de vista del ingeniero de diseño o de fabricación, de forma que las diferentes actividades que se reflejan a lo largo de los diferentes modelos muestran los pasos que debería seguir el ingeniero para establecer qué procesos de fabricación formarán parte de la cadena de procesos de fabricación que fabricará el diseño propuesto.

Siguiendo el procedimiento de la metodología IDEFØ, se expone en primer lugar el diagrama A-0 donde se considera una única función que engloba todo el procedimiento para la derivación de las cadenas de procesos de fabricación. Seguidamente se descompondrá esta función única en diversos niveles de detalle.

3.2.1 "Derivar de la cadena de procesos" (A-0)

La Figura 27 muestra las entradas, salidas y controles que influyen en la función para la derivación de las cadenas de procesos de fabricación. La entrada de la actividad *A0* incluye el *boceto CAD* (el modelo del producto en un estado inicial), las *especificaciones de diseño* y el *conjunto de procesos de fabricación* almacenados en la base de conocimiento. La salida de la actividad es la *cadena de procesos de fabricación viable*. Los controles de la actividad son *reglas de descripción de las formas básicas*, los flujos de información que ayudan a facilitar la confección de la cadena, los cuales incluyen: *la información del proceso de fabricación*, *las reglas de secuencia de los procesos de fabricación* y *la clasificación de los procesos de fabricación*. Se incluye también el mecanismo *Ingeniero* que intervendrá en la ejecución de la actividad en aquellas partes que requieren interactividad.

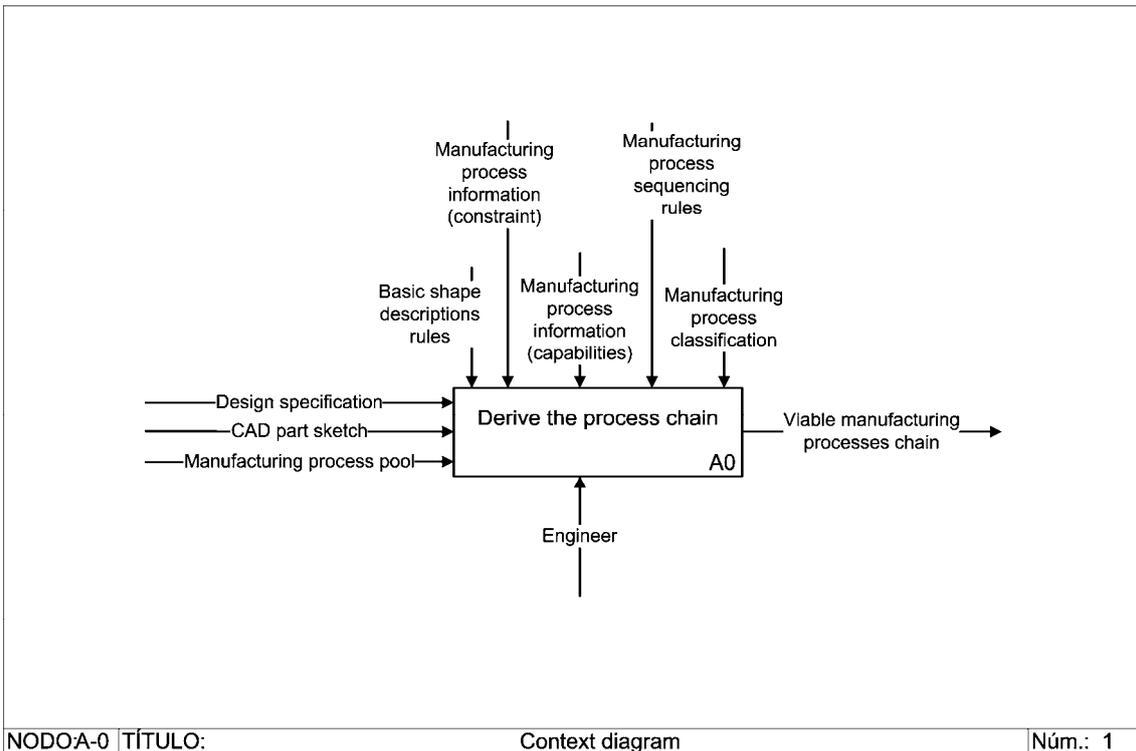


Figura 27 – Contexto del algoritmo (A-0).

Esta actividad principal, *A0*, se divide en cuatro actividades específicas: analizar el producto (*A1*), analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel 1 (*A2*), analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel n (*A3*) y visualizar la cadena de procesos de fabricación final (*A4*). Estas actividades se muestran en la Figura 28 y se exponen a continuación con mayor detalle.

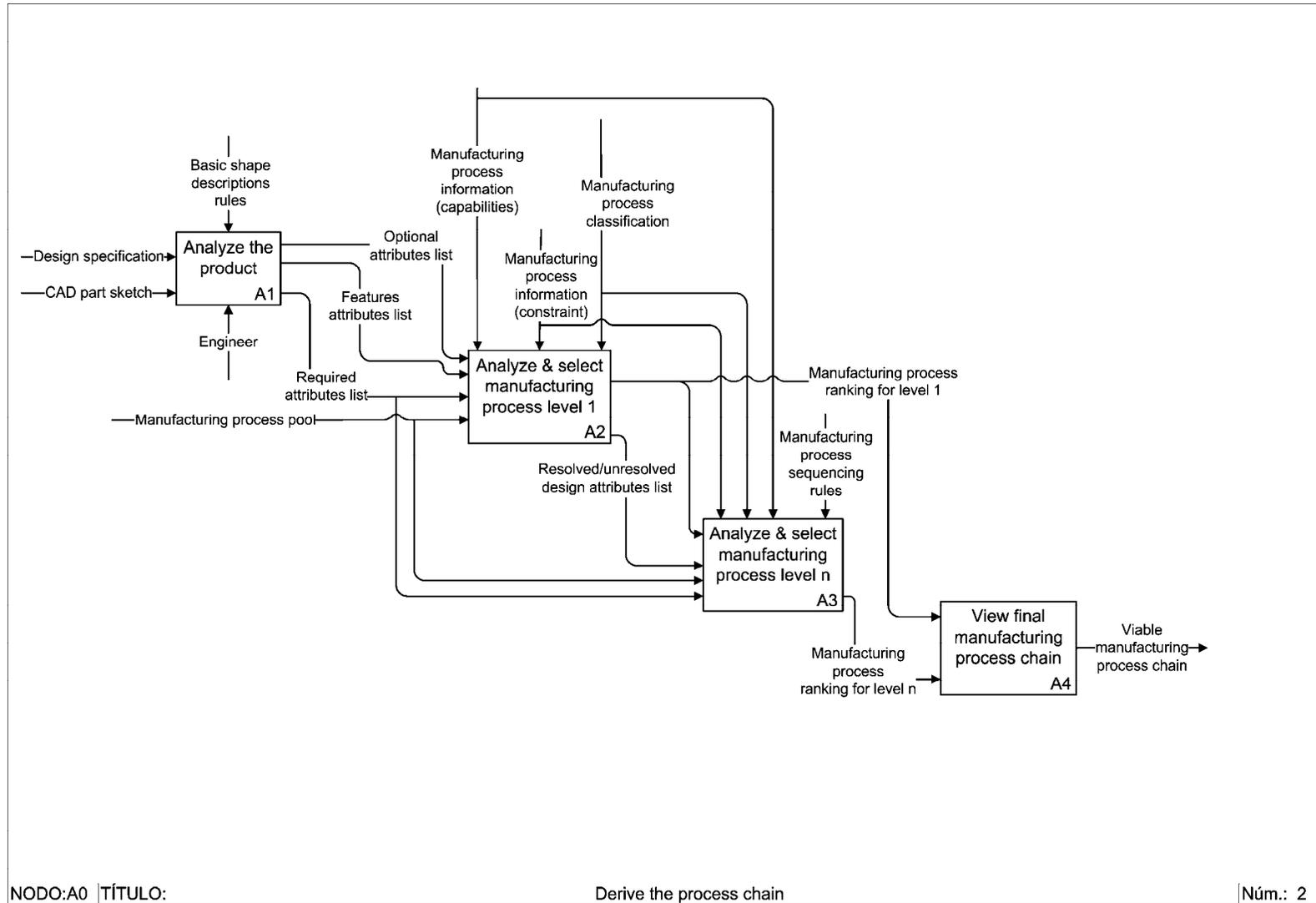


Figura 28 – Primer nivel de la derivación de la cadena de procesos.

3.2.1.1 “Analizar del producto” (A1)

El objetivo de esta actividad es convertir la información de diseño que proviene del *boceto CAD de la pieza* en un conjunto de atributos de diseño con el que el algoritmo pueda trabajar. Teniendo presente lo mencionado en el apartado 3.1, el algoritmo propuesto utiliza los atributos identificados en la selección de procesos de fabricación para comparar el boceto CAD con los procesos de fabricación y realizar la selección de cada eslabón de la cadena. A partir de estos atributos se elabora un resumen del diseño y serán distribuidos en diferentes listas según el modo en que serán satisfechos por la cadena de procesos de fabricación. La Figura 29 muestra las diferentes actividades que hay que llevar a cabo para completar la actividad *A1*.

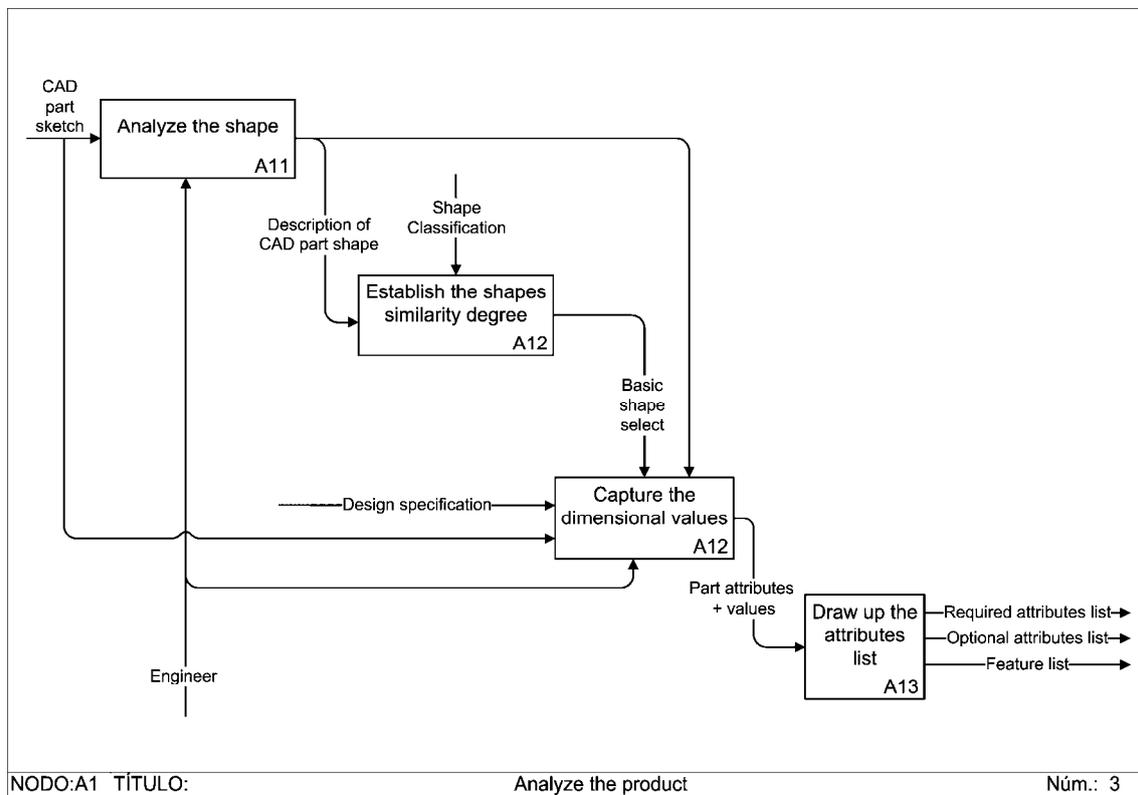


Figura 29 – Detalle de la actividad A1.

A1.1. “Analizar la forma”

En esta sub-actividad (Figura 29) el objetivo es estructurar la forma del *boceto* en elementos claves que permitan obtener una descripción analítica de dicha forma. El resultado que se consigue se denomina la *descripción del boceto*.

Esta descripción analítica se realiza mediante la descomposición del modelo CAD en secciones homogéneas, a las cuales se les ha llamado volúmenes. También se identifican las relaciones entre volúmenes, para definir el contorno, y las relaciones entre la forma principal y las características geométricas que completan el contorno de la pieza. Este conjunto de volúmenes y su correspondiente relaciones se han

obtenido estudiando en profundidad la clasificación de formas propuesta por Swift & Booker (Swift y Booker, 2003). Se ha elegido esta clasificación por los siguientes motivos: en primer lugar tiene en consideración aspectos de diseño y fabricación, en segundo lugar divide las piezas en categorías (revolución, prismáticas y chapa) y complejidades, y por último incluye modelos genéricos para definir cada grupo junto con comentarios aclaratorios.

El hecho de disponer de la forma descrita en forma analítica tiene dos ventajas básicas. La primera de ellas es que se puede extraer información geométrica del modelo CAD de forma directa, sin necesidad de volver a introducir los datos. Y la segunda es que se reduce el grado de subjetividad que se produce cuando se realiza de forma visual la correspondencia entre la forma del diseño con alguna de las formas de una clasificación existente para hacer la selección. Proceso bastante habitual en las herramientas de selección de procesos (apartado 2.1.3)

A1.2. “Establecer el grado de similitud de la forma”

El objetivo de esta sub-actividad (Figura 29) es establecer la relación entre la *descripción analítica de la forma* y la *jerarquía de formas* propuesta en la clasificación de Swift & Booker (Swift y Booker, 2003) y el resultado es la *forma básica seleccionada*. Para ello hay que calcular el grado de similitud entre la descripción analítica de la forma y la parametrización de las diversas clases de formas propuestas por Swift & Booker (Swift y Booker, 2003). Esta operación de *grado de similitud* se adopta de la metodología tecnología de grupos (*código GT*), donde esta metodología codifica un producto con una cadena alfanumérica que representa la información crítica. Comparar los *códigos GT* es un método rápido y eficiente para estimar la similitud de los productos con relación a los atributos seleccionados (Liverani y Ceruti, 2010; Girdhar, 2001).

A1.3. “Capturar el valor dimensional”

El objetivo de esta sub-actividad (Figura 29) es capturar las dimensiones que contiene el modelo CAD mediante la *descripción analítica de la forma* elaborada en la actividad A1.1. Dichos datos también se complementan con otras *especificaciones de diseño* que incluyen: datos de producción, material y valores de rugosidad.

En esta actividad también se convierte toda la información capturada en lo que se denomina “atributos de diseño”, los cuales son básicos para la obtención de cadenas de procesos.

AI.4. “Elaborar las listas de atributos”

La actividad *AI* concluye con la sub-actividad *AI.4*. Esta sub-actividad tiene como objetivo organizar toda la información extraída por las sub-actividad anteriores, en tres listas de atributos, dependiendo de cómo tendrán que ser satisfechos por la cadena de procesos de fabricación.

- La primera lista agrupa los atributos requeridos. Los atributos que se tienen en consideración son: “material”, “forma”, “peso”, dimensiones máximas y mínimas del volumen (“longitud”, “alto”, “ancho”).
- La segunda lista es la lista de atributos opcionales. Los atributos que se tienen en consideración para la lista de atributos opcionales son: “rugosidad general”, “rugosidades” de las diferentes caras de la pieza, “tolerancias” de las diversas dimensiones, “grosor mínimo de pared”, “ratio de aspecto” y “ratio de sección adyacente”.
- La tercera lista es la de características geométricas, donde una característica geométrica se refiere al procesamiento significativo de una porción de la forma de la pieza o del conjunto (Hoffmann et al., 2008). Por ejemplo, serían características geométricas: agujeros, ranuras, etc.

3.2.1.2 “Analizar y selecciona los proceso de fabricación en el nivel 1” (A2)

El objetivo de esta actividad es analizar y seleccionar el primer eslabón de la cadena de procesos de fabricación. Para ello se parte del *conjunto de procesos de fabricación* almacenado en la base de conocimiento y de las *listas de atributos requeridos, opcionales y características geométricas*. Para refinar la selección de los procesos de fabricación se ayuda del control *información del proceso de fabricación*. Se obtienen dos salidas; la primera de ellas, el *conjunto de procesos de fabricación ordenados para ocupar al primer eslabón o primer nivel de la cadena* y la segunda, la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos*.

Un *atributo resuelto* es aquel que ha sido completamente transformado o alterado por el proceso de fabricación. Mientras que un *atributo no resuelto* es aquel que requiere de un proceso de fabricación adicional para alcanzar el valor deseado. Por ejemplo, cuando la “rugosidad” que se exige en un determinado diseño se consigue mediante dos procesos de fabricación consecutivos, como ‘forja’ y ‘mecanizado’, significa que la “rugosidad” se ha considerado como *atributo no resuelto* después de haber decidido que el primer eslabón o nivel de la cadena fuera ocupado por el proceso de ‘forja’. Mientras que cuando una determinada “altura” de pieza se consigue directamente con el proceso de ‘forja’, se considera que este es un *atributo resuelto*.

Esta actividad *A2* ha sido descompuesta en cinco sub-actividades, mostradas en la Figura 30, y descritas a continuación:

A2.1. “Seleccionar procesos de fabricación compatible con el material”

En esta sub-actividad, el objetivo es cribar el conjunto de procesos de fabricación almacenados según su capacidad para manipular el material seleccionado para la pieza que se quiere fabricar. Para ello cuenta con las entradas *conjunto de procesos de fabricación almacenados en la base de conocimiento* y el atributo “*material*” de la *lista atributos requeridos* y devuelve la *lista de procesos de fabricación compatible con el material*. Tal y como se expone en los trabajos de Lovatt (Lovatt y Shercliff, 1998b) y Van Kesteren (Van Kesteren et al., 2008) se ha determinado que el atributo “*material*” realiza una alta discriminación entre los procesos de fabricación almacenados porque este atributo es el más restrictivo en términos de la selección de procesos de fabricación y reduce el rango de búsqueda en pasos posteriores.

Esta primera selección de los procesos de fabricación se desglosa en dos actividades más como es visible en la Figura 31. La primera actividad selecciona del flujo de entrada *conjunto de procesos de fabricación almacenados* en la base de conocimiento, todos aquellos procesos de fabricación clasificados como *primarios* por el flujo de control *clasificación de los procesos de fabricación*. Esto se debe a que en esta primera actividad se está empezando a crear la cadena de procesos de fabricación, por esta razón los procesos a seleccionar deben imprimir la forma sobre el material. Con lo cual y siguiendo la clasificación propuesta, esto recae sobre los procesos de fabricación primarios. La segunda actividad compara esta selección de procesos de fabricación con la entrada atributo “*material*” de la *lista de atributos requeridos* para hacer progresar aquellos procesos de fabricación que sean capaces de manipular el material de la pieza. Los procesos de fabricación que superen estas dos actividades conformarán la salida de la actividad *A2.1*, la *lista de procesos de fabricación compatible con el material*.

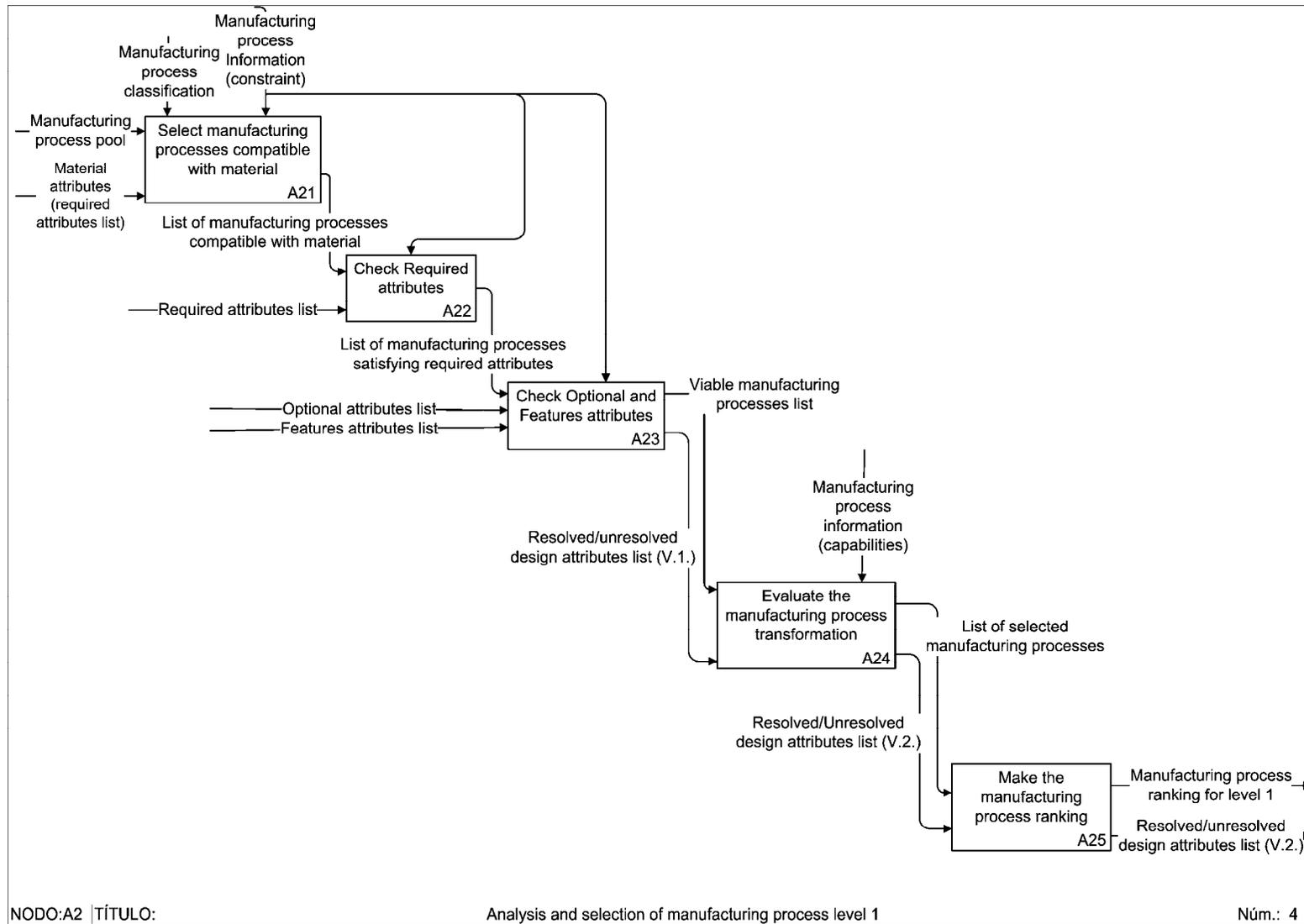


Figura 30 – Detalle de la actividad A2 – Analizar y seleccionar los procesos de fabricación en el nivel 1.

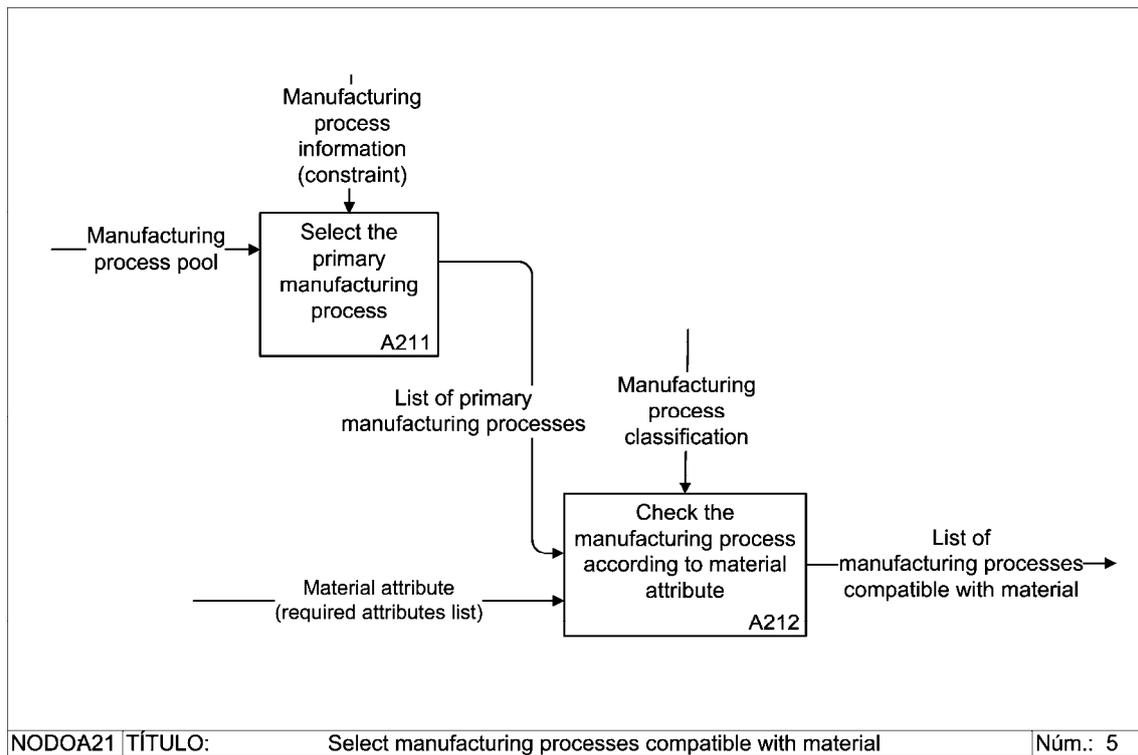


Figura 31 – Detalle de la actividad A21 – Seleccionar procesos de fabricación compatible con el material.

A2.2. “Comprobar los atributos requeridos”

El objetivo de esta sub-actividad (Figura 30) es comprobar la idoneidad de los procesos incluidos en la *lista de procesos de fabricación compatibles con el material* (salida de la actividad *A2.1*) para fabricar el resto de atributos de diseño requeridos (ej. “forma”, “dimensiones” o “peso”). Si el proceso de fabricación analizado no es capaz de manipular alguno de los atributos de la *lista atributos de diseño requeridos*, será descartado. Mientras que los procesos de fabricación que sean capaces de realizar todos los atributos de la *lista de atributos requeridos* serán incluidos en la salida de esta actividad *A2.2*.

A2.3. “Comprobar atributos Opcionales y características geométricas”

El objetivo de esta sub-actividad es comprobar qué atributos de la *lista de atributos de diseño opcionales y de características geométricas* pueden ser alterados por los procesos de fabricación de la *lista de procesos de fabricación que satisfacen los atributos requeridos*.

Esta actividad se desglosa en la Figura 32, donde se diferencia claramente el tratamiento de las dos listas de atributos. Por un parte la actividad *A2.3.1* hace la comprobación con los atributos *opcionales* y por otra parte la actividad *A2.3.2* hace

la comprobación con las *características geométricas*. Hay que remarcar que en este punto ya no se descartan procesos de fabricación, pues según la definición de ambas lista un proceso de fabricación no tiene por qué ser capaz de fabricar la totalidad de estos dos tipos de atributos. Como consecuencia en esta sub-actividad se confecciona la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos* para cada proceso de fabricación seleccionado. De este modo se almacenan cuáles de estos atributos han sido manipulados por el proceso de fabricación y cuáles no.

El resultado de esta actividad está compuesto por dos salidas (ver Figura 32): la *lista de procesos de fabricación viables*, donde se indica los procesos de fabricación seleccionados, y la *lista de atributos resueltos o no resueltos*.

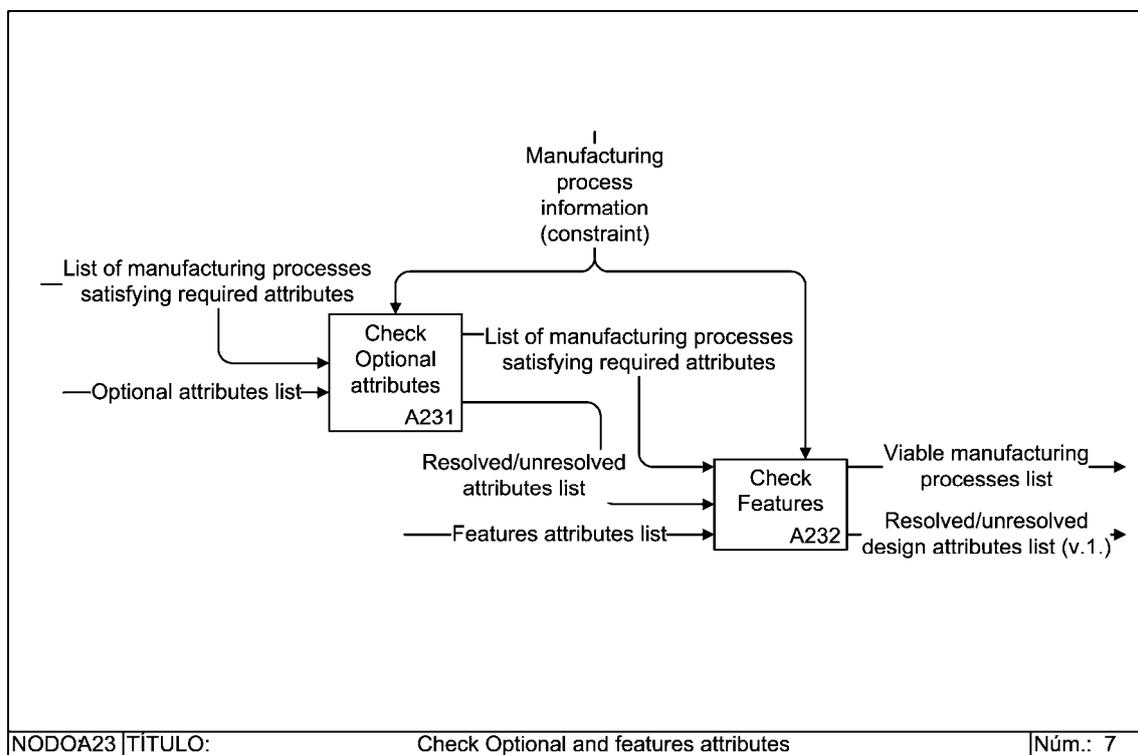


Figura 32 – Detalle de la actividad A23 – Comprobar atributos Opcionales y Características geométricas.

A2.4. “Evaluar la transformación del proceso de fabricación”

La capacidad de transformación de los procesos de fabricación es la capacidad de cada proceso de fabricación para modificar los atributos de un producto ya sea desde el estado inicial o después de una alteración previa hecha por otro proceso de fabricación. La diferencia con las restricciones de los procesos radica en que las restricciones indican los límites del atributo (ej. la “longitud” máxima de un producto fabricado con sinterizado se sitúa entre 15 mm y 20 cm) mientras que la capacidad de transformación indica cuánto se puede modificar un atributo desde un estado inicial determinado (ej. para el caso del sinterizado la “longitud” puede variar

un máximo de 20 cm). Para evaluar la transformación es necesario llevar a cabo las actividades de la Figura 33, donde primero hay que *calcular la transformación requerida (actividad A2.4.1)* y segundo hay que *compararlo con la capacidad de transformación de los procesos de fabricación para cada atributo (actividad A2.4.2)*.

Para calcular la transformación necesaria en el producto es necesario comparar, para cada atributo, el estado en que se encuentra dicho atributo antes de entrar en el proceso y el estado en el que debería estar al final del mismo. No obstante, en esta actividad *A2.4.1* no se dispone de este primer estado para poder realizar el cálculo de la transformación, ya que se está seleccionando el primer proceso de la cadena de procesos. Por consiguiente el estado inicial dependerá del material de partida que puede procesar cada proceso, el control *información del proceso de fabricación* proporciona para cada proceso de fabricación el tipo de bruto de partida que utiliza, ya sea material fundido, material en polvo o un tocho de material. Esta actividad *A2.4.1* proporciona como salida los valores de transformar cada uno de los atributos incluidos en la *lista de atributos resueltos* que debería proporcionar el proceso de fabricación analizado para lograr el valor establecido por el diseño.

En la actividad *A2.4.2* se comparan los valores obtenidos por la actividad *A2.4.1* con la capacidad de transformación de los procesos de fabricación analizados. Como resultado de la comparación se pueden dar dos situaciones. La primera de ellas es que los valores calculados de transformación sean menores o iguales a los indicados en la *capacidad de transformación del proceso de fabricación*, esta situación el proceso de fabricación es apto para llevar a cabo totalmente la transformación de los atributos de la *lista de atributos de diseño resueltos*. Con lo cual no habrá necesidad de modificar los atributos de diseño resueltos ni los no resueltos. Y la segunda situación sucede cuando los valores de transformación calculados son mayores que los indicados en la *capacidad de transformación del proceso de fabricación*, lo cual conllevará a actualizar la *lista de atributos resueltos y no resueltos*, de manera que con aquellos atributos en que el proceso de fabricación no alcance su valor significará pasar de la lista de *atributos resueltos* a *atributos no resueltos*. De forma que, la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos (V.1)* mostrada en la entrada de la actividad *A2.4.2* se convierte en una segunda *versión (V.2)* en la salida de dicha actividad (Figura 33), así como también se obtiene la lista final de los procesos de fabricación que realizan estas transformaciones.

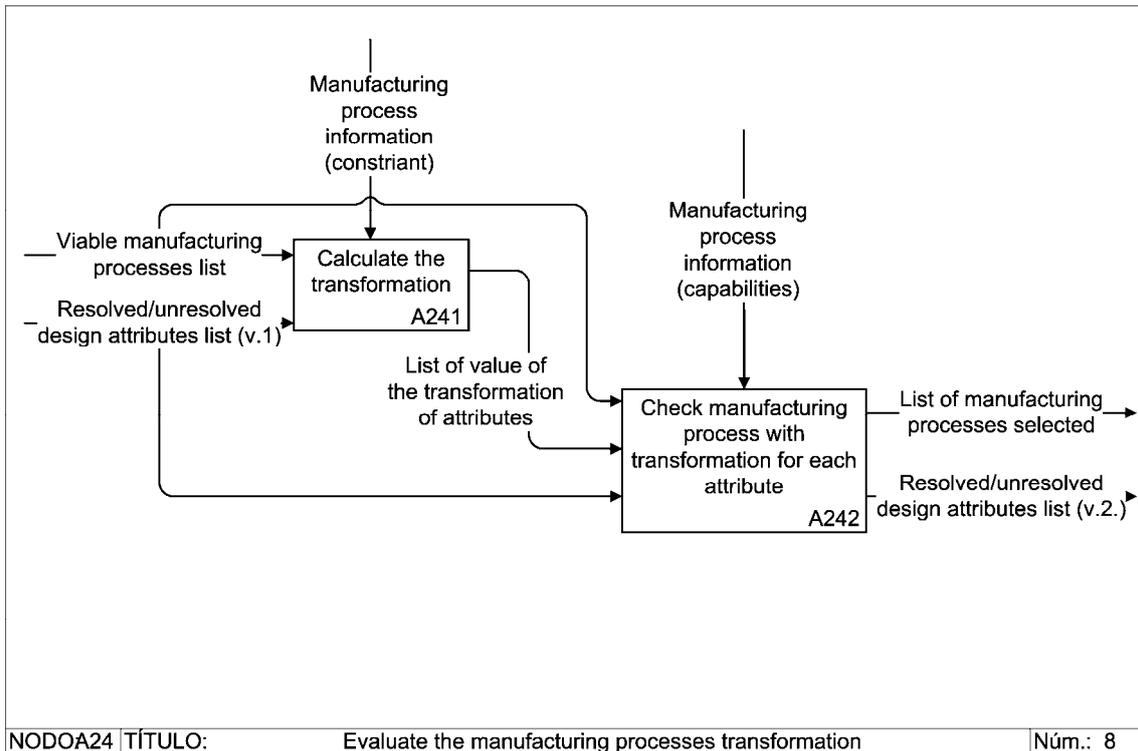


Figura 33 – Detalle de la actividad A24 – Evaluar la transformación del proceso de fabricación

A2.5. “Hacer el ranking de los procesos de fabricación”

El objetivo de la última sub-actividad de la actividad A2 es proporcionar al ingeniero de diseño o de fabricación una lista ordenada de los procesos de fabricación seleccionados en la actividad anterior según la afinidad de estos en relación con los requisitos de diseño establecidos. Para ello se propone el criterio técnico que se muestra en la Ecuación 1

$$CT = \frac{1}{N_{at}} * \sum_{i=1}^{at} \frac{|V_{salida_i} - V_{diseño_i}|}{Max(V_i)}$$

Ecuación 1 criterio técnico.

Siendo los diferentes operadores de la ecuación:

- CT = Criterio técnico de clasificación
- Nat = Numero de atributos de diseño definidos
- at = Lista de atributos de diseño
- i = Atributo analizado
- Vsalida = Valor del atributo a la salida del proceso
- Vdiseño = Valor de diseño del atributo
- Max (V) = Valor máximo del atributo dentro del eslabón

El criterio técnico propuesto se basa en cuantificar la distancia entre el valor objetivo de los atributos de diseño ($V_{diseño}$) y el valor resultante que se consigue con cada uno de los procesos seleccionados almacenado en la *lista de atributos resueltos y no resueltos* (V_{salida}) (Figura 34 y Figura 35). Considerando la amplia dispersión numérica que puede existir entre los diferentes atributos y el efecto de distorsión en el cálculo que esto puede ocasionar es necesario llevar a cabo un proceso de normalización. Este proceso consiste en normalizar cada distancia con el valor máximo del atributo analizado entre todos los procesos seleccionados que ocupan este primer eslabón ($Max(V)$). Finalmente cada atributo puede ser ponderado con un determinado peso específico, el cual permite graduar la importancia entre los mismo. No obstante en la ecuación que se presenta todos los atributos tienen la misma importancia o índice de ponderación ($1/Nat$).

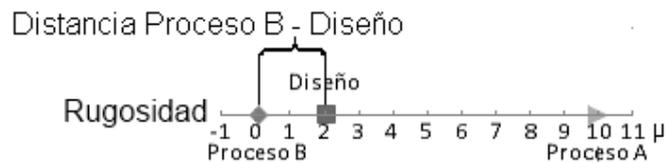


Figura 34 – Distribución en el espacio de los valores de rugosidad

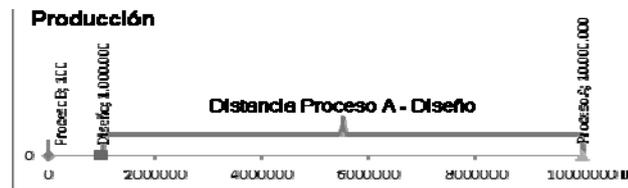


Figura 35 – Distribución en el espacio de los valores de producción

Desde una perspectiva más conceptual este criterio técnico evalúa la distancia entre la pieza parcial que se obtiene en cada proceso de fabricación respecto a la pieza que está determinada por diseño. Al usar una distancia permite asegurar que el criterio técnico cumple con las siguientes propiedades matemáticas:

$$d: M \times M \rightarrow R$$

$$d(x, y) \geq 0, \text{ para } x \text{ e } y \text{ en } M.$$

$$d(x, y) = 0, \text{ sí y sólo si } x = y.$$

$$d(x, y) = d(y, x), \text{ para todo par de elementos } x \text{ e } y \text{ en } M.$$

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z), \text{ para } x, y, z \text{ elementos en } M.$$

Al usar la función distancia como base del criterio técnico y centrarlo sobre los valores de diseño asegurar que el resultado de su aplicación será válido y su adaptabilidad al espacio de 'n' dimensiones en el que se utilizó. Por ejemplo la Figura 36 muestra de forma gráfica la aplicación del criterio sobre un espacio de dos dimensiones.

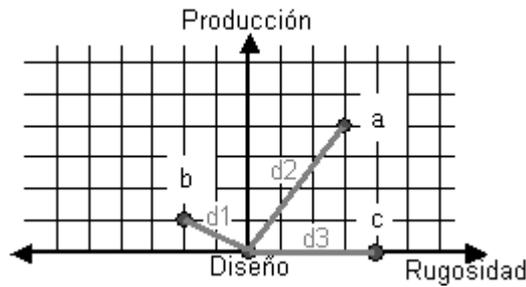


Figura 36 – Esquema de un espacio de dimensión 2 con el diseño y tres procesos seleccionados

En concreto en la Figura 36 se observa que en el centro de coordenadas se ha centrado el diseño y los diferentes procesos de fabricación seleccionados, aquí representados con las letras *a*, *b* y *c*, están repartidos por el resto del espacio. Entre ambos puntos se calcula la distancia ‘*d*’.

Cuando la actividad *A2* se ha completado, puede suceder que con un sólo proceso de fabricación se fabrique completamente la pieza o por lo contrario que sea necesario continuar construyendo la cadena de procesos de fabricación. Esta decisión se determina mediante la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos*. Si todos los atributos de diseño están dentro de los ‘resueltos’, la cadena de procesos de fabricación está concluida y la actividad *A2.4* mostrará esta cadena de procesos de fabricación. De lo contrario cuando hay atributos de diseño en la lista de ‘no resueltos’, ya sea porqué hay atributos que no han sido tratados por el proceso o porqué sólo se logre obtener una parte de ellos se prosigue con la actividad *A3*.

Se prosigue la explicación del modelo IDEF0 asumiendo que en la salida *lista de atributos de diseños resueltos y no resueltos* de la actividad *A2* contiene un subconjunto de atributos de diseño con la etiqueta de ‘no resuelto’

3.2.1.3 “Analizar y seleccionar procesos de fabricación en el nivel n” (A3)

La actividad *A3* se encarga de continuar la elaboración de la cadena de procesos de fabricación hasta que todos los atributos de diseño estén resueltos. Por lo tanto se irá repitiendo hasta que todos los atributos de diseño definidos pertenezcan al subconjunto de atributos de diseño ‘resueltos’ de la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos*.

La entrada *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel n-1* se usa en la evaluación de los nuevos procesos de fabricación para el subsiguiente eslabón de la cadena de procesos de fabricación. No obstante en esta actividad se incorpora el control de las *reglas de secuencia de los procesos de fabricación*. El objetivo de este control es validar si la nueva combinación entre el eslabón y el candidato es técnicamente viable, ya que no todas las combinaciones entre procesos de fabricación son técnicamente posibles. Por lo tanto, este conjunto de reglas valida cada combinación de procesos de fabricación propuesta por la actividad.

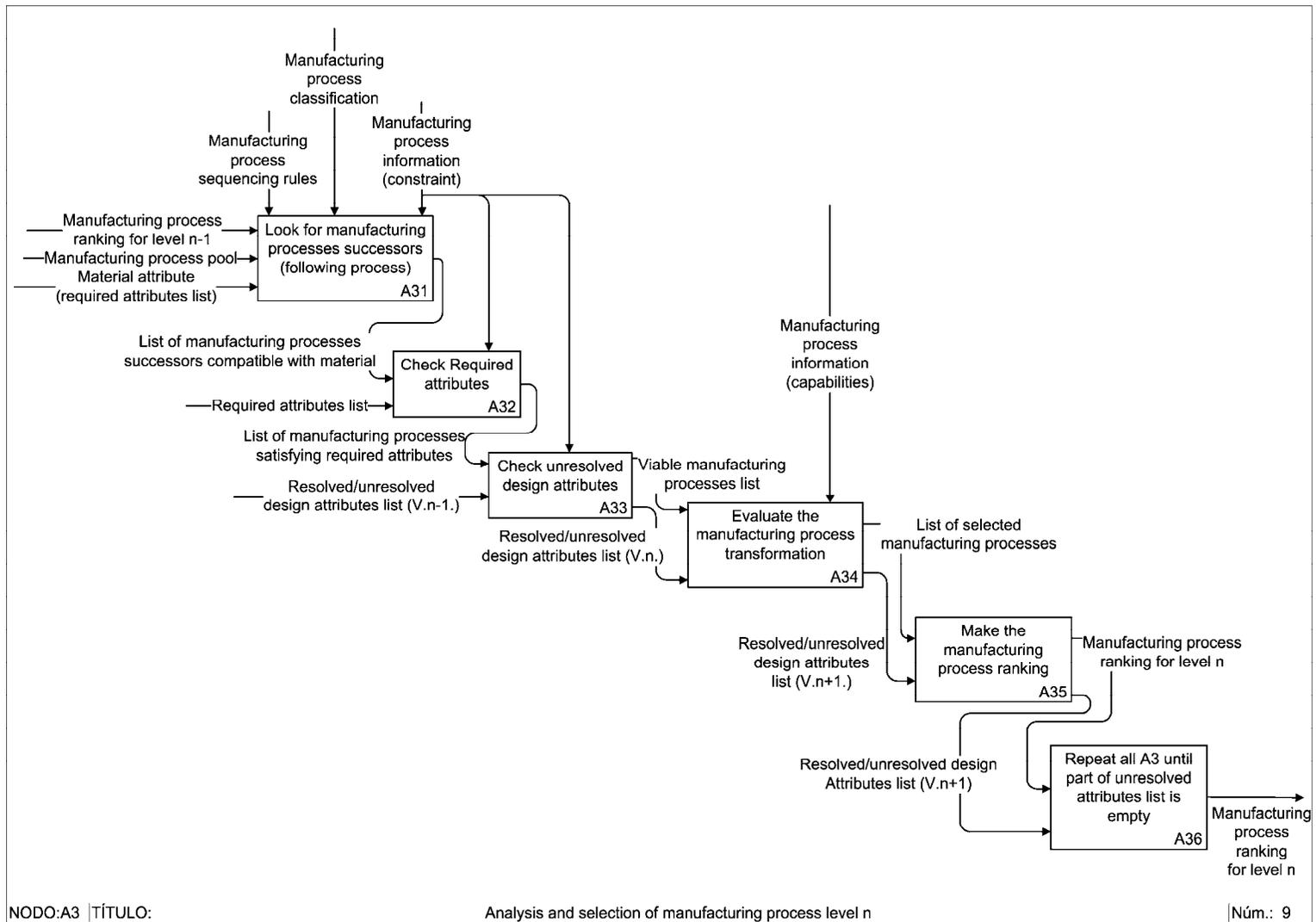


Figura 37 – Detalle de la actividad A3 –Analizar y seleccionar proceso de fabricación en el nivel n.

El procedimiento de la actividad *A3* es similar al presentado en la actividad *A2*. Básicamente existen dos diferencias: la primera es que ahora se parte de la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos* obtenida en la actividad *A2* en lugar de la *lista de atributos opcionales y características geométricas*. Y la segunda, es que las entradas para el cálculo de la transformación se realizarán mediante la *lista de parámetros de diseño resueltos y no resueltos* del proceso de fabricación previo.

En la Figura 37 se muestra la descomposición de la actividad *A3* en seis sub-actividades, las cuales se describirán detalladamente en los siguientes apartados

A3.1. “Buscar procesos de fabricación sucesores (proceso siguiente)”

El objetivo de esta sub-actividad es obtener los posibles procesos de fabricación que sean candidatos a concluir la cadena de procesos de fabricación. Para ello, en primer lugar hay que buscar dentro de la *base de procesos de fabricación* los procesos que pueden suceder al último proceso de fabricación incluido en la cadena. Para realizar este filtro se utilizan el control de las *reglas de secuencias* donde se enumeran para cada proceso de fabricación cuales pueden ser sus sucesores. Otro filtro impuesto para garantizar la viabilidad de la cadena de procesos de fabricación es que sean procesos catalogados como *secundarios* o *terciarios* dentro de la *clasificación de los procesos de fabricación* que se ha utilizado. Es decir, que los procesos que son candidatos a formar parte de una cadena determinada tienen que ser clasificados en el mismo nivel que el proceso anterior o en un nivel inferior.

En segundo lugar hay que validar que los procesos de salida de la actividad sean compatibles con el material indicado para la pieza, debido a las mismas justificaciones que en la actividad *A2.1*.

A3.2. “Comprobar atributos requeridos”

El objetivo de esta sub-actividad es garantizar que los procesos seleccionados en la actividad anterior y almacenados en *Lista de procesos de fabricación sucesores compatibles con el material* sean capaces de procesar todos los *atributos de diseño requeridos* restantes. El procedimiento para garantizar esta plena compatibilidad entre los atributos requeridos y los procesos seleccionados hasta el momento será el mismo que el empleado en su homóloga sub-actividad *A2.2*.

A3.3. “Comprobar atributos de diseño no resueltos”

El subconjunto de atributos etiquetados como ‘no resueltos’ de la *lista de atributos resueltos y no resueltos (V. n-1)* proporciona que atributos no han alcanzado la totalidad de su valor final, ya sea porqué los procesos de fabricación previos no los

han tratado aún o porque aunque habiéndolos tratado, la suma de las transformaciones hechas por los procesos de fabricación anteriores no ha sido suficiente para obtener el valor final de los atributos de diseño.

El objetivo de esta sub-actividad es comprobar que parte de lo que queda para fabricar del diseño, almacenado en *lista de atributos resueltos y no resueltos (V. n-1)*, es capaz de fabricar cada uno de los procesos de la lista de procesos de fabricación proveniente de la sub-actividad *A3.2 (Lista de procesos de fabricación que satisfacen los atributos requeridos)*. Para ello se compara la información de los procesos de fabricación con la parte ‘no resueltos’ de la *lista de atributos resueltos y no resueltos* y se determina qué atributos de diseño son capaces de alterar cada proceso, dando como resultado la *lista de procesos de fabricación viables* y la *lista de atributos resueltos o no resueltos (V.n)*

A3.4. “Evaluar la transformación del proceso de fabricación”

El objetivo de esta sub-actividad es comprobar si la transformación requerida por los atributos es asumible por el proceso analizado, con los mismos principios que su homóloga *A2.4* aunque la información de partida es diferente en ambas actividades.

En esta sub-actividad únicamente se comprueba la capacidad de transformación de los procesos de fabricación sobre los nuevos atributos de diseño incluidos en la parte de atributos ‘resueltos’ de la *lista de atributos resueltos o no resueltos (V.n)*. Para ello primero hay que calcular la transformación que es necesaria para los atributos de diseño y segundo hay que comparar si dicha transformación es asumible por el proceso de fabricación. En esta actividad, a diferencia de la actividad *A2.4*, el estado inicial de los atributos de diseño depende del valor que se ha conseguido en dichos atributos en el proceso anterior. Como resultado se irá actualizando la *lista de atributos resueltos o no resueltos (V.n)* para ir convirtiéndola en la lista resultante (*lista de atributos resueltos o no resueltos (V. n+1)*)

A3.5. “Hacer el ranking de los procesos de fabricación”

Esta quinta sub-actividad es equivalente a la sub-actividad *A2.5*. Aunque en esta etapa se recogen los procesos de la *lista de procesos de fabricación viables* para realizar la ordenación de los procesos de fabricación del eslabón de la cadena de procesos correspondiente e ir elaborando el flujo de salida *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel n*.

A3.6. “Repetir toda la actividad A3 hasta que la parte no resuelta de la lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos este vacía”

Esta actividad tiene como propósito reiniciar esta actividad *A3* tantas veces como sea necesario hasta que todos los atributos de diseño introducidos en la actividad *A1* estén satisfechos por alguno o varios de los procesos de fabricación que forman la cadena de procesos de fabricación. O lo que es lo mismo, que la parte ‘no resuelta’ de la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos* esté vacía.

3.2.1.4 “Ver las cadenas de proceso de fabricación resultantes” (A4)

El objetivo de esta última actividad es la de estructurar los datos de las diferentes cadenas de procesos de fabricación resultantes de forma que sean fácilmente comprendidos por los ingenieros de diseño o de fabricación.

Esta actividad *A4* se compondrá a partir de las diferentes iteraciones del flujo *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel n*, donde *n* representa cualquiera de las iteraciones hechas por el método de derivación de cadenas de procesos de fabricación. Las iteraciones se irán tejiendo a modo de obtener los diferentes procesos que forman los eslabones de la cadena de procesos de fabricación y los mostrará de una forma gráfica al ingeniero.

3.3 Validación del modelo funcional propuesto

Para validar el modelo IDEFØ propuesto en esta tesis y descrito a lo largo del presente capítulo, se ha realizado un ejemplo donde el escenario considerado es el conjunto de piezas mecánicas. Concretamente el ejemplo que se ha desarrollado ha sido de una matriz de doblado al aire.

En la Figura 38 se muestra el modelo CAD de la matriz de doblado al aire que compondrá la base de esta validación, el punto en donde se ha extraído este modelo CAD es en la fase de materialización que implica un modelo no concluido pero que ya empieza a tener una primera aproximación geométrica. Hay que recordar que una de las razones por la cual se trabaja en la fase de materialización es que los atributos de diseño son más estables y mejor definidos que en la fase conceptual y aún pueden sufrir cambios con respecto a las fases posteriores de diseño.

Siguiendo las actividades del modelo IDEFØ (Figura 28), el modelo CAD de la pieza (Figura 38) será usado como entrada *boceto del modelo CAD*, de este modelo se extraen los atributos de diseño necesarios para proseguir el desarrollo del IDEFØ. Esta explicación no desarrolla la ejecución de la actividad *A1* debido a que el

propósito de este apartado es la validación del método de derivación de cadenas de procesos de fabricación, por lo que se partirá de la actividad A2.

Del análisis del *boceto del modelo CAD*, con la ayuda del ingeniero, se identifican los atributos de diseño y se recopilan sus valores. La Tabla 3 muestra este resultado siguiendo las indicaciones de la actividad A1 (Figura 29) y se encuentran ordenados los atributos dentro de las tres listas de atributos definidas en el modelo IDEFØ.

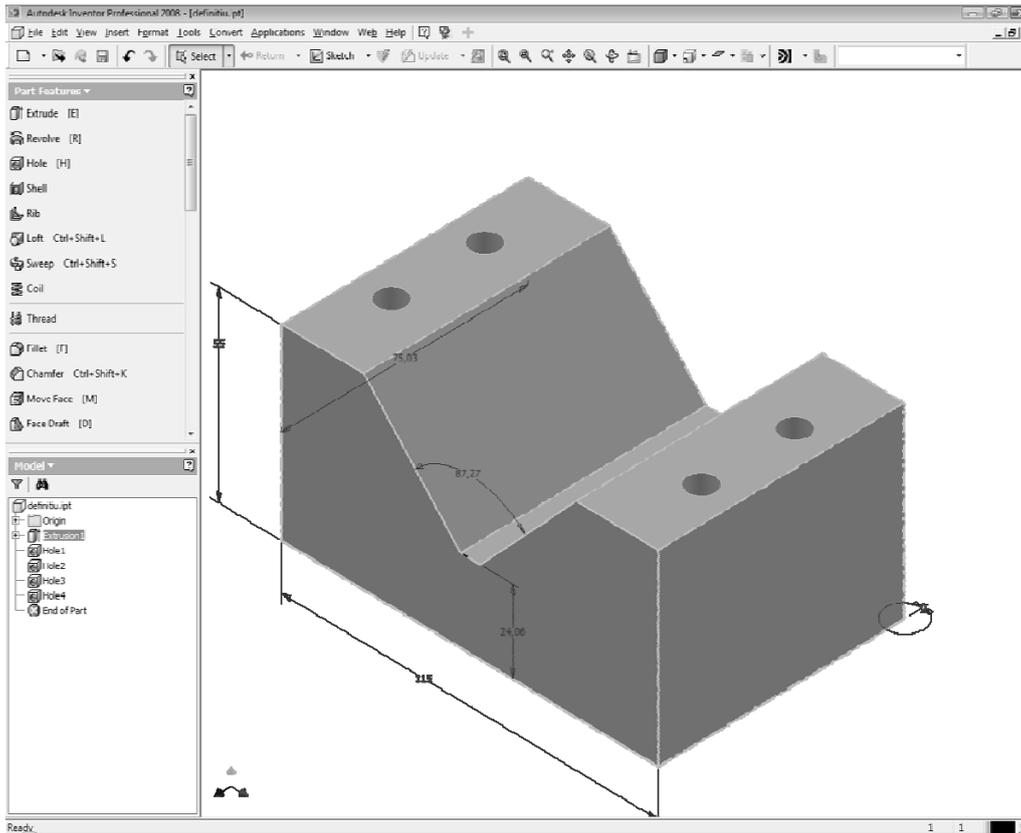


Figura 38 – Boceto CAD de la matriz de doblado.

<i>Lista</i>	<i>Atributo</i>	<i>Valor</i>
Required design attributes	Material	Hierro
	Forma	Prisma rectangular (B1)
	Longitud (X)	[75;75] mm
	Ancho (Y)	[115;115] mm
	Alto (Z)	[24;55] mm
	Peso	3 kg
Optional design attributes	Rugosidad general	10 μm
	Rugosidad específica	5 μm
	Tolerancia general	10
	Tolerancia específica	0,5
	Radio de la esquina	1
Features design attributes	Tipo	Agujero
	Diámetro	8,5 mm
	Altura (Z)	55 mm
	Rugosidad	0,1 μm
	Tolerancia	0,002

Tabla 3 – Valores de los atributos de diseño para el caso de estudio.

La actividad *A2* (Figura 28) usa como entradas las listas de atributos de diseño y el conjunto de procesos de fabricación almacenados en la base de conocimiento para realizar su función, que es la obtención del primer eslabón de las cadenas de procesos de fabricación. Los procesos seleccionados conforman la salida de la actividad (*clasificación de los procesos de fabricación para el nivel 1*), acoplada a esta salida hay una segunda salida (*lista de atributos resueltos y no resueltos*) de atributos personalizados para cada uno de los procesos de fabricación seleccionados por la actividad. La Figura 39 esquematiza el desarrollo de la actividad *A2* y sus sub-actividades (englobadas con línea discontinua) con la información de diseño de la matriz de doblado al aire. Alrededor de esta línea discontinua se han situado las entradas (parte izquierda superior) y las salidas (parte derecha inferior).

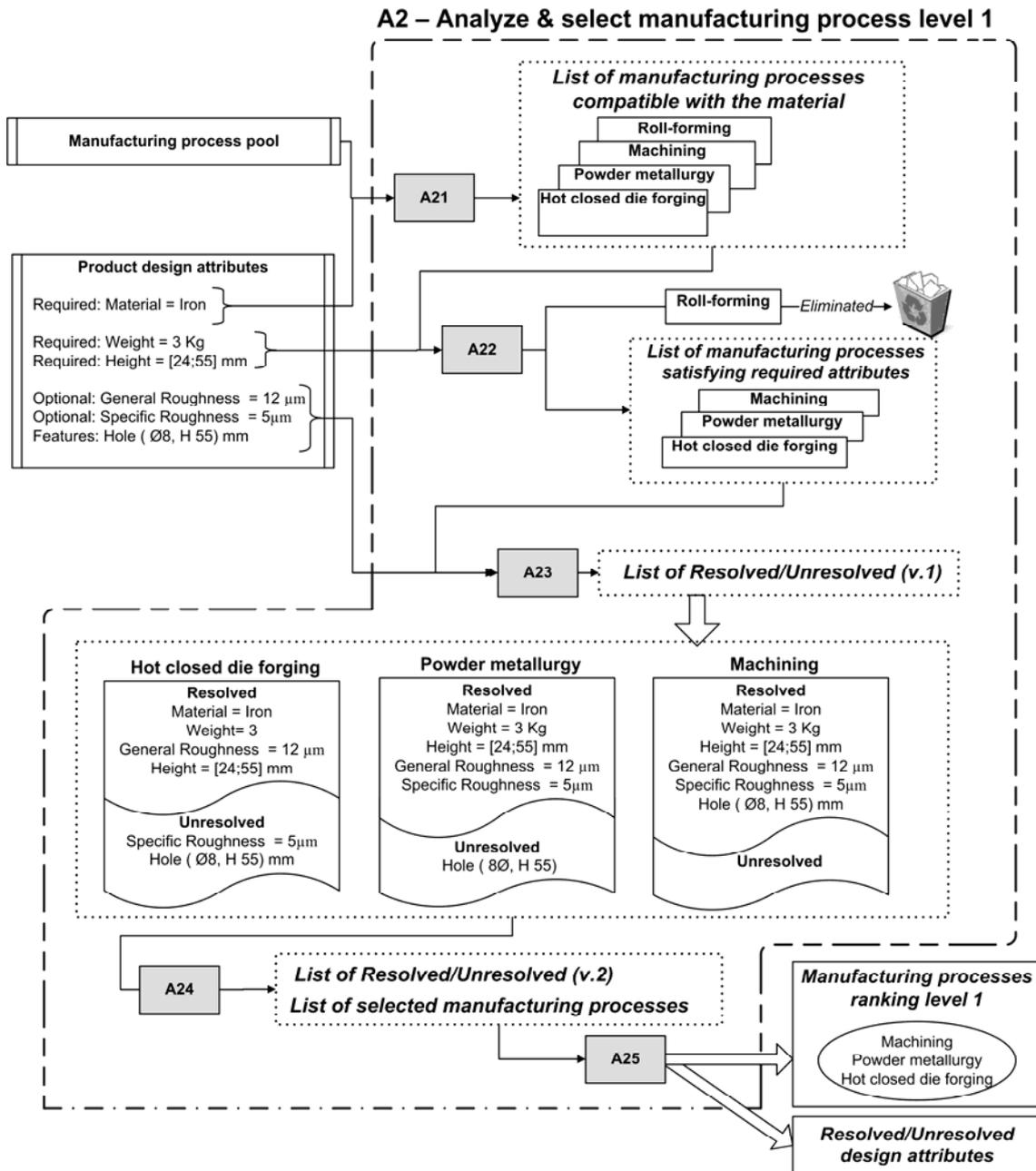


Figura 39 – Diagrama de flujo de la actividad A2.

Para obtener las salidas de la actividad con sus resultados se realizan las cinco sub-actividades propuestas en el modelo (Figura 30) y esquematizadas en la Figura 39. En el ejemplo los procesos seleccionados en el nivel 1 son: ‘forjado en caliente de matriz cerrada’, ‘pulvimetalurgia’ y ‘mecanizado’.

Al aplicar la sub-actividad *A2.1* se obtiene la lista de todos los procesos de fabricación, almacenados en la base de conocimiento, capaces de manipular el material del producto en cuestión, entre ellos: ‘forjado en caliente de matriz cerrada’, ‘pulvimetalurgia’, ‘mecanizado’ y ‘laminado’. Posteriormente, estos procesos de fabricación son nuevamente filtrados por la sub-actividad *A2.2* y *A2.3*, de la

siguiente forma. La sub-actividad *A2.2* comprueba la *lista de procesos de fabricación compatibles con el material* para ver cuáles satisfacen el resto de atributos requeridos, en este ejemplo son “peso” y “altura”. Los procesos de fabricación como ‘forjado en caliente de matriz cerrada’, ‘pulvimetalurgia’ y ‘mecanizado’ cumplen con los atributos requeridos y se les permite continuar como entrada para la siguiente sub-actividad, *A2.3*, dentro de la *lista de procesos de fabricación que satisfacen los atributos requeridos*. Por otro lado, el proceso de fabricación de ‘laminado’ no puede satisfacer el atributo requerido de “altura” y es eliminado de la lista de salida de la sub-actividad *A2.2*. Ahora, la sub-actividad *A2.3* comprueba cuales de los procesos que satisfacen los atributos requeridos son capaces de fabricar atributos opcionales o características geométricas, que en este ejemplo son los atributos de “rugosidad general”, “rugosidad específica” y el “agujero”. La salida una vez finalizada esta sub-actividad es la primera versión de la *lista de los atributos resueltos o no resueltos* para cada uno de los procesos de fabricación analizados.

Como se muestra en Figura 39, el proceso de fabricación ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ puede cumplir con los atributos: “material”, “peso”, “altura” y “rugosidad general” pero no es capaz de realizar los atributos “rugosidad específica” y el “agujero”. Esto significa que si se selecciona el proceso de fabricación de ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ como cabeza de la cadena será necesario un proceso de fabricación subsiguiente que complete la pieza. Mientras que en el caso de seleccionar como cabeza de la cadena el proceso de ‘mecanizado’, al ser capaz de resolver todos los atributos de diseño planteados, no será necesario incluir procesos de fabricación posteriores a él en esta cadena de procesos de fabricación.

El modelo IDEF0 continua con la sub-actividad *A2.4* el análisis de los procesos de fabricación para certificar que cada uno de ellos pueda transformar realmente los objetivos establecidos en las *listas de atributos resueltos y no resueltos* que provienen de la sub-actividad *A2.3*. La Figura 40 muestra los valores resultantes de evaluar la capacidad de transformación para el proceso de fabricación ‘forjado en caliente de matriz cerrada’.

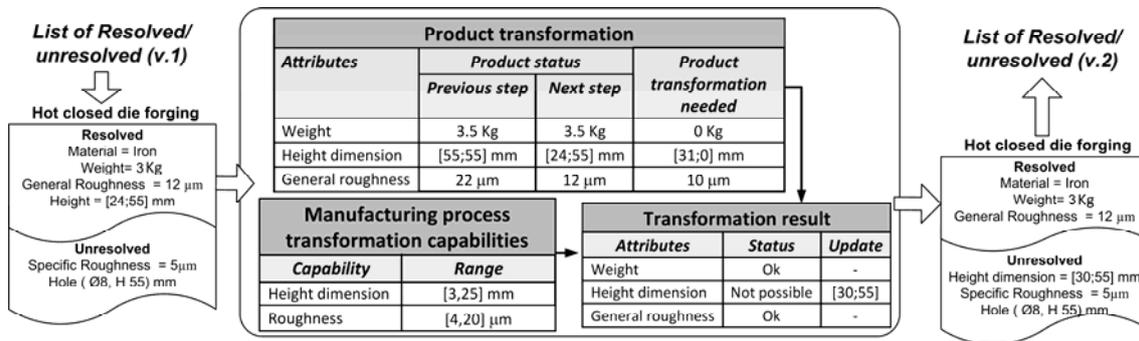


Figura 40 – Evaluar la capacidad de transformación del proceso de fabricación forjado en caliente de matriz cerrada.

El primer paso es calcular la transformación que tienen que sufrir los atributos de diseño del producto entre la entrada y la salida del proceso de fabricación que están etiquetados como ‘resueltos’ en la *lista de atributos resueltos y no resueltos (v.1)*. Para el caso del proceso ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ tiene que transformar los atributos de “peso”, “altura” y “rugosidad general” desde un estado inicial (columna *paso previo* de la tabla *transformación del producto*) hasta un estado final (columna *paso siguiente* de la tabla *transformación del producto*). En este caso, el estado inicial se corresponde con el estado del bruto de partida, ya que se está buscando el primer proceso que puede conformar el primer eslabón de la cadena y el estado final contiene los atributos de diseño definidos. Los atributos de diseño que aparecen en el ejemplo están cuantificados con un valor numérico – como el “peso” – o con un rango de valores que representan los valores máximos y mínimos que aparecen en la pieza – como es el caso la “altura” –. La última columna (*transformación necesaria del producto*) de la tabla *transformación del producto* almacena el resultado de la transformación del producto ya sea como valor numérico o como rango de valores.

Estos resultados de la transformación del producto (columna *transformación necesaria del producto* de la tabla *transformación del producto*) se comparan con la capacidad de transformación del ‘forjado en caliente de matriz cerrada’. La tabla *capacidades de transformación del proceso de fabricación* muestra los valores de transformación de cada uno de los atributos para este proceso. Al comparar ambas columnas se obtiene la tabla *resultados de la transformación*, donde se muestran aquellos atributos que el proceso de ‘forjado’ puede transformar y los que no.

Se observa que el proceso de ‘forjado’ realiza los atributos “peso” y “rugosidad general” pero el atributo “altura” de la pieza no lo puede transformar al completo. En concreto, la transformación desde el valor inicial de 55 mm hasta el valor final 24 mm implica una transformación de 31 mm. Para este proceso la

capacidad máxima de transformación del atributo “altura” se sitúa entre 3 mm y 25 mm, lo que lleva a alterar el valor de salida del atributo “altura” a 30 mm. Con esta modificación del valor del atributo “altura” se adapta a la actual capacidad de transformación, el proceso de fabricación y por consiguiente, este atributo que parecía ser ‘resuelto’ en la *lista de atributos resueltos y no resueltos (v.1)*, se convierte en ‘no resuelto’ al final de esta actividad (*lista de atributos resueltos y no resueltos (v.2)*).

La actividad *A2* concluye con la sub-actividad *A2.5* (Figura 39), en la cual los procesos incluidos en la *lista de procesos de fabricación seleccionados* son ordenados acorde al criterio técnico propuesto, produciendo la salida *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel 1*. Como se muestra en la Figura 39, para el ejemplo explicado el orden de los procesos propuesto es ‘mecanizado’, ‘forja’ y ‘pulvimetalurgia’. Esto se debe a que el proceso de ‘mecanizado’ no tiene ningún atributo ‘no resuelto’, el proceso de ‘forja’ tiene dos y finalmente el del ‘pulvimetalurgia’ tiene un total de tres atributos ‘no resueltos’.

En este punto, ya se ha obtenido la primera cadena de procesos de fabricación para fabricar la matriz, formada simplemente con el proceso de ‘mecanizado’. Sin embargo, para los procesos ‘pulvimetalurgia’ y ‘forja’, que aún tienen atributos ‘no resueltos’, será necesario continuar construyendo la cadena de procesos de fabricación. Por lo tanto se debe llevar a cabo la actividad *A3* para dichos procesos de fabricación. La Figura 41 visualiza la información circulante en la actividad *A3*. En esta figura se ubica en la parte superior izquierda las cuatro entradas: *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel 1*, *conjunto de procesos de fabricación almacenados en la base de conocimiento*, *las listas de atributos de diseño* y *las listas de atributos resueltos y no resueltos*.

Para este caso, las *reglas de secuenciación* de los procesos de fabricación indican qué procesos de fabricación clasificados como *secundarios* pueden ser concatenables con el ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ y son: ‘mecanizado’, ‘pulido’ y ‘galvanoplastia’. Este conjunto de procesos serán los analizados a lo largo de la actividad *A3* para formar parte de la cadena de procesos de fabricación actual.

Se empieza analizando (sub-actividad *A3.1*) si los procesos del conjunto sucesor son capaces de manipular el “material” dando la *lista de procesos de fabricación sucesores compatibles con el material*, de la cual se excluye el proceso de ‘galvanoplastia’.

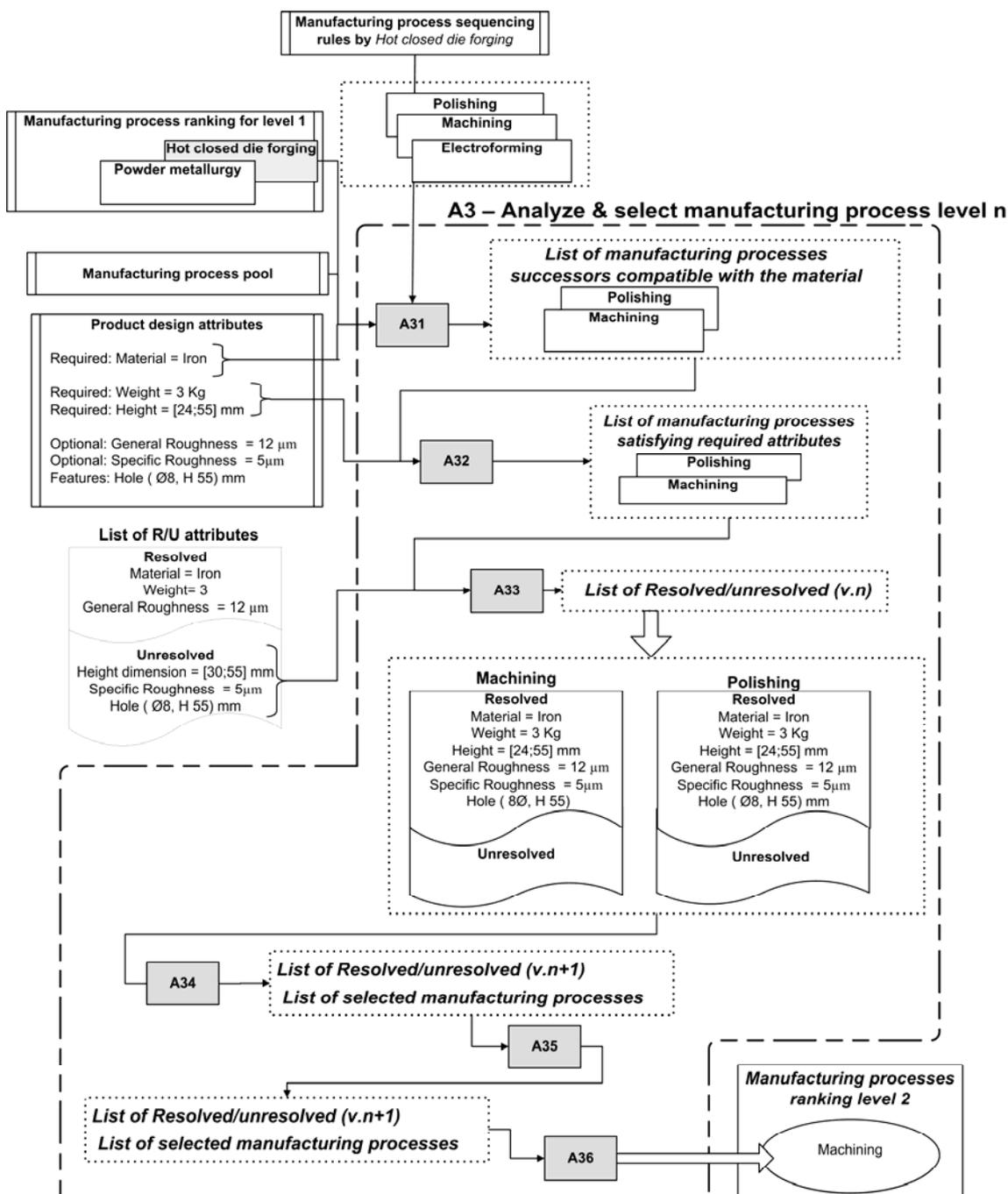


Figura 41 – Diagrama de flujo de la actividad A3.

Los procesos de fabricación seleccionados en la sub-actividad *A3.1* deben de cumplir con el resto de los atributos de diseño requeridos. Esta comprobación se realiza en la sub-actividad *A3.2* y se obtiene como resultado todos aquellos procesos de fabricación que cumplen con los atributos requeridos. Todos los procesos de fabricación analizados cumplen esta condición, con lo cual no se descarta a ninguno, a diferencia de la actividad *A2.2*.

La sub-actividad *A3.3* evalúa los atributos que aún faltan por fabricar, entre los cuáles se incluyen la “altura”, la “rugosidad específica” y el “agujero”. Para ello se comparan estos atributos, etiquetados como ‘no resueltos’ en la *lista de atributos resueltos y no resueltos*, con las capacidades de los procesos seleccionados confeccionando una nueva *lista de atributos resueltos y no resueltos* para cada uno de los procesos candidatos a suceder el proceso de ‘forja’. En el centro de la Figura 41 hay representada la actualización de la *lista de atributos resueltos y no resueltos* teniendo en consideración la aportación del proceso de ‘mecanizado’ o del proceso de ‘pulido’. Pero con este primer filtrado no es suficiente para garantizar el buen uso de la cadena, sino que se deberá evaluar si los procesos de fabricación seleccionados son capaces de realizar la transformación exigida por los atributos de diseño desde el estado del proceso anterior hasta su valor objetivo. El desglose de esta actividad se ha plasmado en la Figura 42.

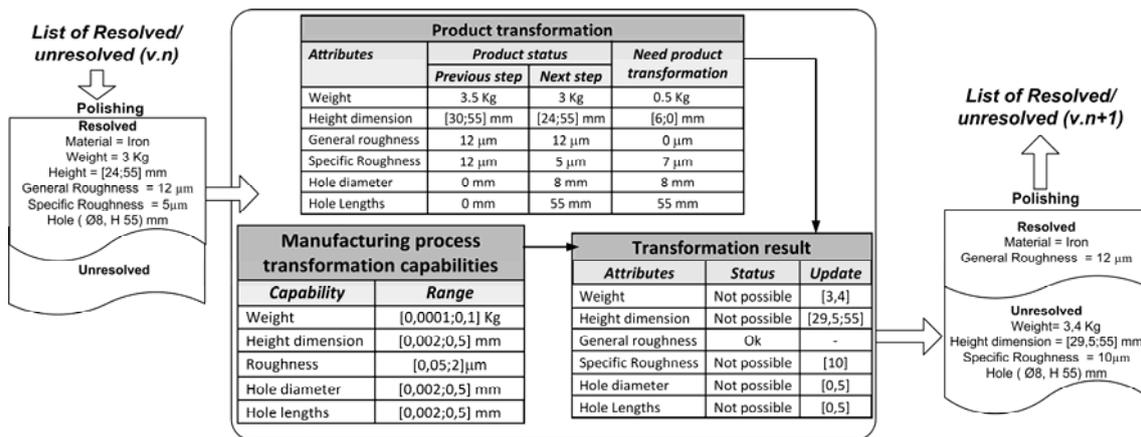


Figura 42 – Evaluar la transformación del proceso de fabricación pulido.

La sub-actividad *A3.4* reproduce el análisis de transformación de los procesos candidatos a ocupar el siguiente eslabón de la cadena. Conceptualmente la actividad se ejecuta de la misma manera que se ha explicado en la sub-actividad *A2.4*. La Figura 42 ejemplifica el análisis de transformación y los resultados obtenidos para el proceso candidato pulido. A la luz de los resultados presentados se modifica la *lista de atributos resueltos y no resueltos* para reflejar la transformación efectiva del proceso de pulido sobre el diseño final y se da lugar a la versión “n” de la *lista de atributos resueltos y no resueltos*.

Una vez ejecutada la sub-actividad *A3.4* sobre todos los procesos de la *lista de procesos de fabricación viables*, se realiza la clasificación de éstos mediante el criterio técnico definido. Esta graduación es llevada a cabo por la sub-actividad *A3.5* proporcionado como salida la *clasificación de los procesos de fabricación para el nivel actual*.

La actividad *A3* concluye con la sub-actividad *A3.6*, en la cual se reinicia la actividad *A3* para las cadenas de procesos de fabricación que contengan atributos de diseño etiquetados como ‘no resueltos’ en la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos*. En el ejemplo propuesto, se debería continuar la cadena compuesta por los eslabones: ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ y ‘pulido’, debido a que la *lista de atributos resueltos y no resueltos* contiene atributos no resueltos. Lo que implica que se reiniciará de nuevo la actividad *A3* pero con la diferencia que en este nuevo ciclo el proceso de referencia será el ‘pulido’ y los sucesores de éste.

Si en alguno de los ciclos de retroalimentación al pasar por la sub-actividad *A3.6* la *lista de atributos de diseño resueltos y no resueltos* únicamente contiene atributos ‘resueltos’ no se reiniciará la actividad *A3* sino que se ejecutará la actividad *A4* (Figura 28). Esta última actividad presenta las cadenas resultantes de la ejecución del algoritmo de derivación. En concreto para la matriz de doblado al aire se han obtenido tres cadenas. La primera, la cadena ‘mecanizado’, obtenido al finalizar la actividad *A2*. La segunda, la cadena ‘forjado en caliente de matriz cerrada – mecanizado – pulido’, que ha sido la usada en esta validación para describir la evolución del método de derivación. Y finalmente se puede calcular otra cadena formada por ‘pulvimetalurgia – mecanizado – pulido’, que completa los procesos seleccionados al final de la actividad *A2*. Estas tres cadenas de procesos de fabricación se muestran en la Figura 43 de forma gráfica e integrada dentro del marco establecido para el desarrollo de este método.

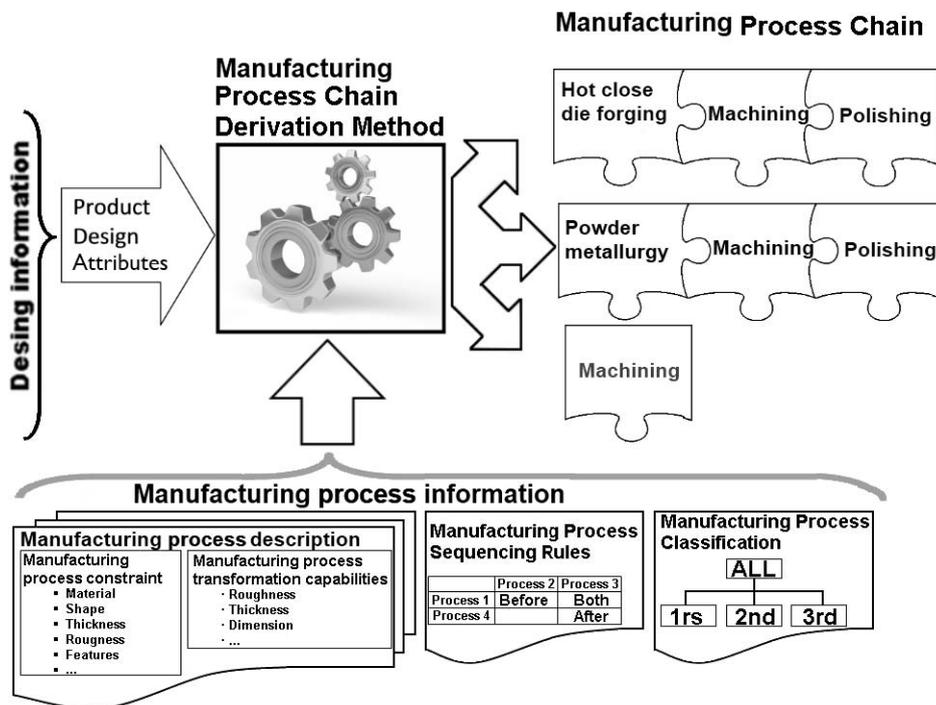


Figura 43 – Combinación de los resultados del caso de estudio con el contexto del algoritmo.

3.4 Resumen de la propuesta para el modelo funcional

A continuación se expone un diagrama que resume el modelo que se ha explicado a lo largo de esta sección al completo, Figura 44. Este modelo ha sido la base para desarrollar los modelos de implementación, presentados en el Capítulo 4 , y la consecuente implementación de la aplicación informática que asiste al ingeniero diseñador o al de procesos para configurar cadenas de procesos de fabricación, expuesta en el Capítulo 5 .

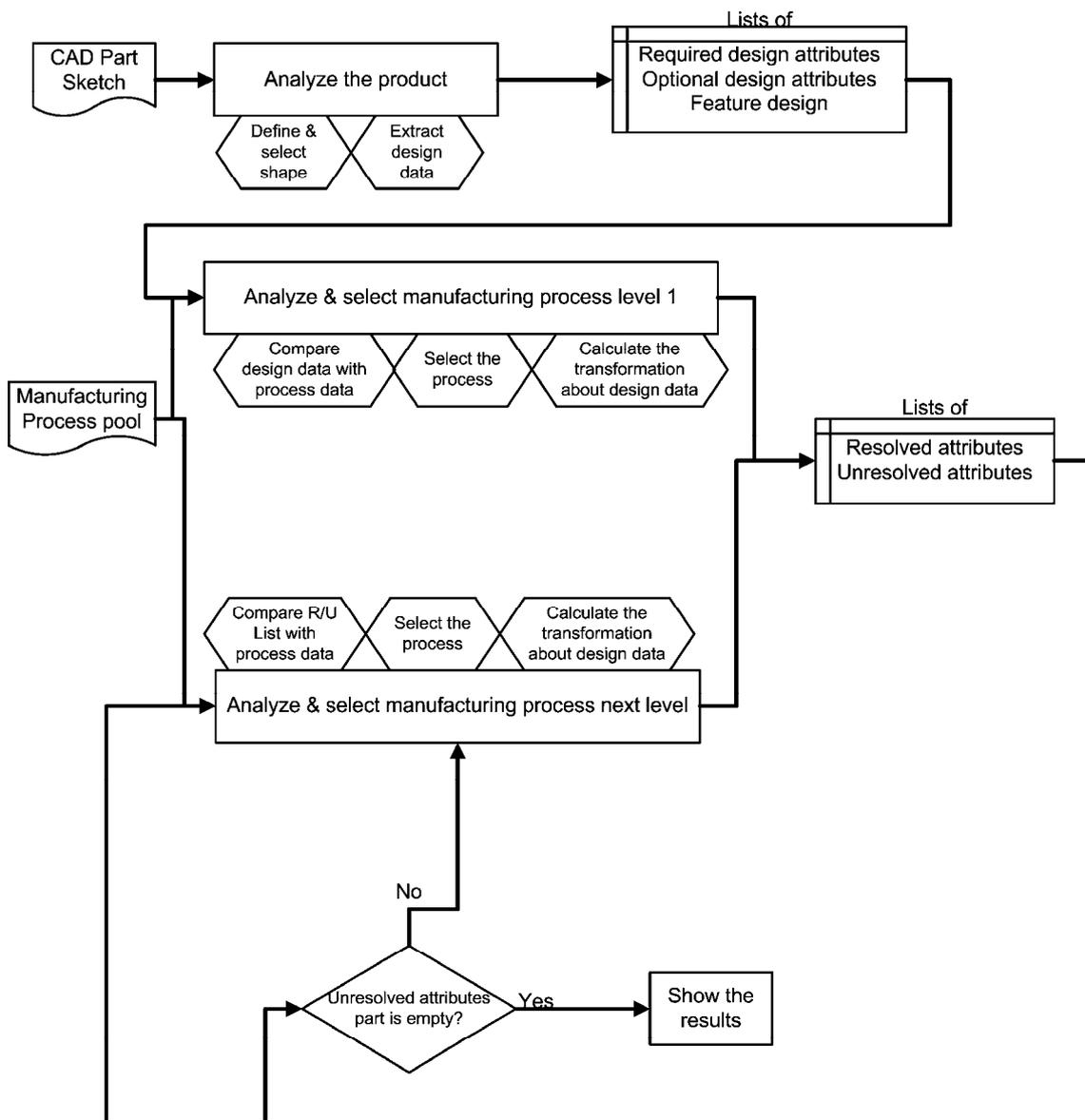


Figura 44 – Resumen de las etapas de la propuesta.

Capítulo 4 Modelado del algoritmo de derivación

En este capítulo se documenta el comportamiento de la aplicación desarrollada, que consiste en generar un conjunto de modelos que describen varios aspectos de la aplicación. Para ello se utiliza el lenguaje unificado de modelado (UML) que permitirá analizar y diseñar el sistema desde diferentes puntos de vista. En concreto para esta tesis se han desarrollado los diagramas de casos de uso para recoger los requerimientos del sistema, los diagramas de actividades y de clases para recoger la estructura estática del sistema, y los diagramas de secuencia para recoger la evolución dinámica y las interacciones.

4.1 Diagrama de casos de uso

Los diagramas de casos de uso reflejan el funcionamiento del sistema y como los usuarios desean que funcione. Por lo tanto se especifican las funcionalidades que darán respuesta a las especificaciones planteadas por los usuarios.

El primer caso de uso (Figura 45) muestra el contexto de la aplicación informática que codificará el algoritmo expuesto en el Capítulo 3 . La aplicación se desarrollará integrada dentro de un sistema CAD para así estar disponible durante el

desarrollo del boceto de las piezas del producto y para una mayor integración con los datos de diseño del modelo CAD. Para alcanzar estos propósitos se ha desarrollado la aplicación como un componente, porque este tipo de aplicación puede estar inmersa en el sistema CAD e interactuar con él. Debido a su estructuración modular, los sistemas CAD pueden incorporar nuevos componentes, ejecutarlos y establecer comunicación entre el componente y el sistema CAD.

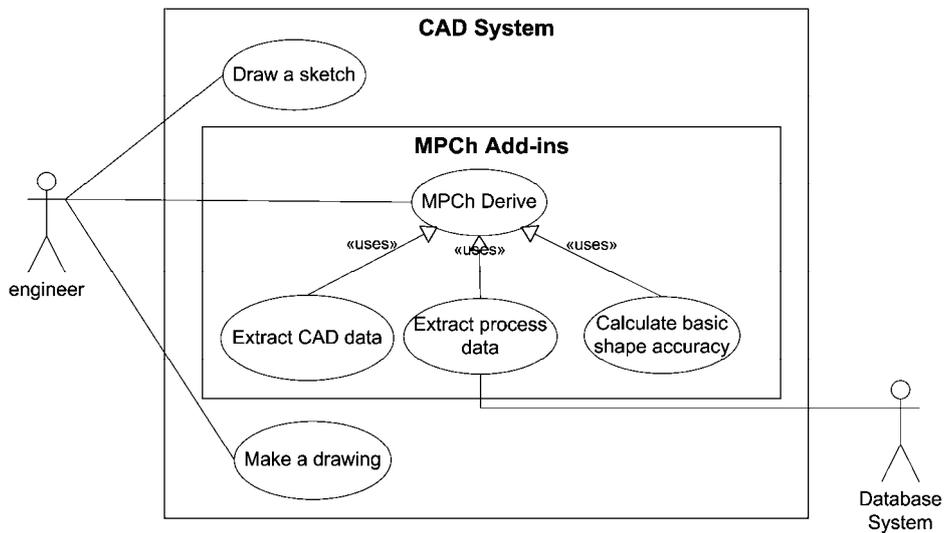


Figura 45 – Casos de uso de la aplicación para la confección de las cadenas de procesos de fabricación.

Existen otras formas de realizar aplicaciones vinculadas a un sistema CAD, como refleja la Figura 46 pero se ha establecido que para una mayor usabilidad para el ingeniero esté disponible como otra opción presente en un sistema CAD.

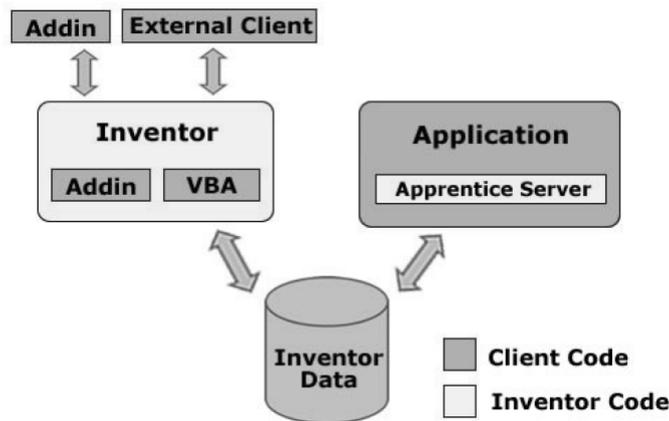


Figura 46 – Posibilidades de interactuar con Autodesk Inventor, fuente: (Lochan, 2008).

Este diagrama (Figura 45) establece los límites de la aplicación. Dos de las tareas principales que un ingeniero suele realizar con un sistema CAD son: dibujar el modelo CAD del producto y confeccionar los planos para las piezas. Se ha incluido la

aplicación para elaborar las cadenas de procesos de fabricación entre estas dos funciones (*MPCh Add-ins*).

Esta nueva aplicación interactúa con el ingeniero para ofrecer el algoritmo *derivación de cadenas de procesos de fabricación (MPCh derive)* que le propondrá caminos para la fabricación de una pieza determinada del producto diseñado agrupados en cadenas de procesos de fabricación. Esta función principal se apoya en diferentes funciones auxiliares que darán una mayor abstracción al algoritmo. Las funciones auxiliares son: la *Extracción de la información del sistema CAD*, la conexión del algoritmo con la base de datos de procesos de fabricación se realiza mediante la *Extracción de datos de proceso* y finalmente el *calcular la afinidad del modelo CAD respecto a las formas básicas propuesta*.

Se ha considerado la base de datos de procesos de fabricación como un actor externo ya que se utilizará para su administración un gestor de base de datos independiente tanto a la aplicación implementada como al sistema CAD.

Por su parte la función *MPCh derive* se ha descompuesto en subfunciones para explicitar las principales aportaciones desde el punto de vista del usuario y se plasman en la Figura 47.

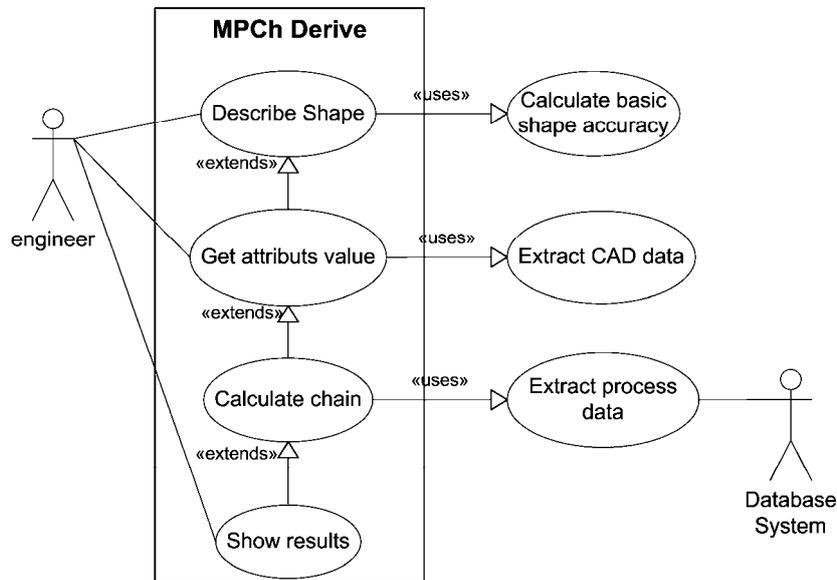


Figura 47 – Casos de uso detallado de la aplicación.

La primera subfunción *Describir la forma* del modelo plantea una parametrización de la forma del modelo que se usará para clasificar el modelo en una de las formas básicas permitidas. Para realizar esta clasificación la función *Describir la forma* emplea la función auxiliar *calcular la afinidad con las formas básicas*.

La segunda subfunción *Obtener el valor de los atributos* recopila los valores de los diferentes atributos de diseño contemplados para la ejecución del algoritmo de *derivación de cadenas de procesos de fabricación* en función de la descripción y de la

clasificación de la forma. Asociada a esta función, se ha implementado la función auxiliar *Extraer información del sistema CAD* para reducir la introducción manual de la información y reutilizar la información que el modelo ya alberga.

La tercera subfunción *Calcular la cadena* es la que propiamente codifica el algoritmo. Esta función requiere como entrada: por una parte, la información de diseño obtenida mediante las dos subfunciones previas y por otra, la información de los procesos de fabricación almacenada en una base de datos externa. El puente entre la función *Calcular la cadena* y la base de datos lo implementa la función auxiliar *Extraer información del proceso de fabricación*.

Concluye la función *MPC_h derive* mostrando los resultados al usuario, esta última función *Mostrar resultados* recoge los resultados obtenidos a lo largo de la ejecución del algoritmo de derivación y lo expone de forma visual a la vista del usuario.

4.2 Diagrama de actividades

Los diagramas de actividades describen el flujo de desarrollo de un proceso de la aplicación. Para ello se establecen los actores que desarrollaran las actividades o tareas del proceso analizado.

En la Figura 48 se identifican cuatro actores (*Ingeniero, Sistema CAD, Algoritmo de derivación y Base de datos*) según lo estipulado en los casos de uso y se modela la ejecución de la aplicación para la confección de las cadenas de procesos de fabricación.

Para modelar el flujo de actividades, el modelo se apoyó en las operaciones: condicionales, donde el flujo debe contestar a una pregunta y según la respuesta toma uno u otro camino; iteraciones, donde se repite un camino un determinado nombre de veces; y concurrencia, donde dos actividades son ejecutadas al mismo tiempo.

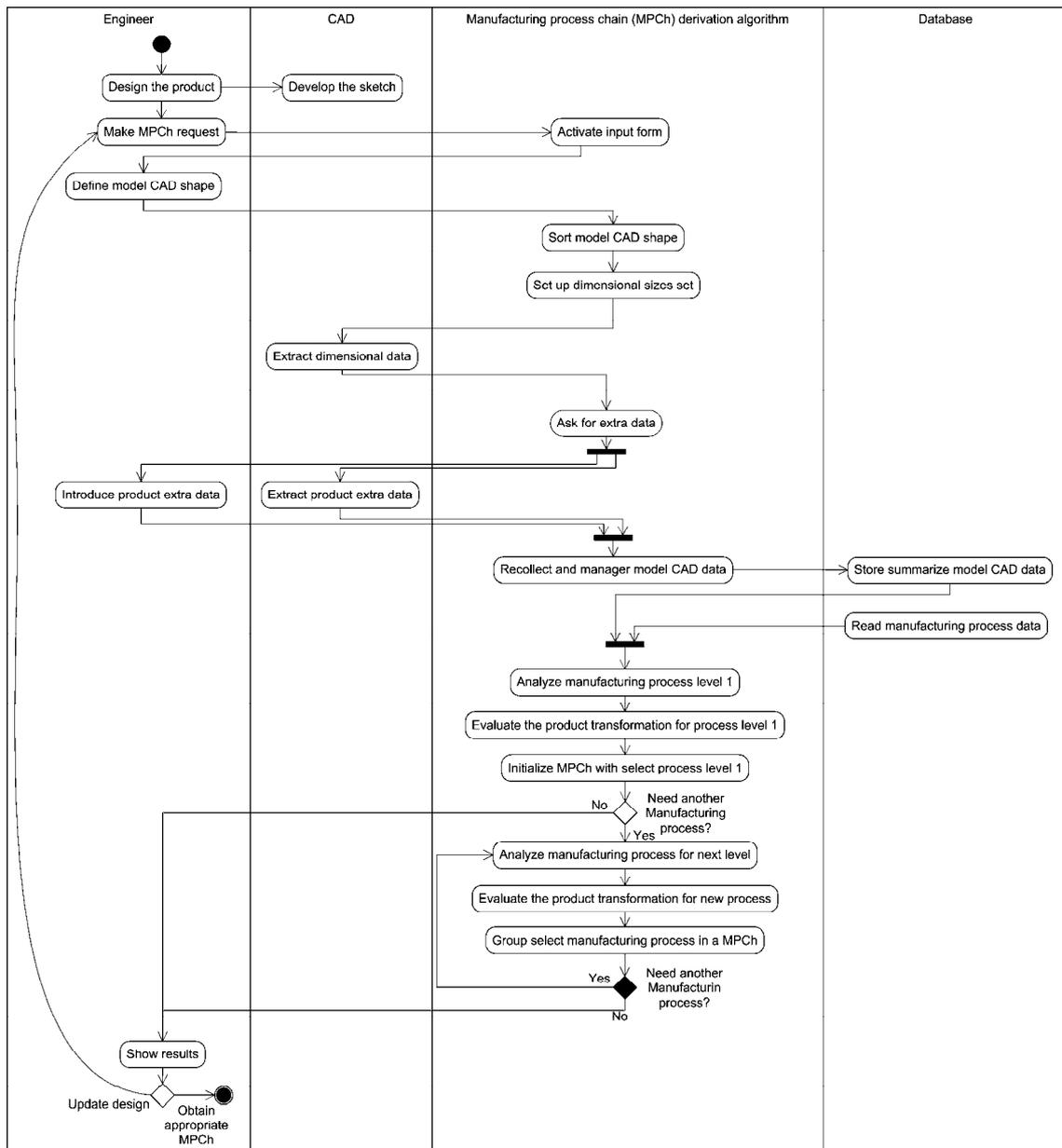


Figura 48 – diagrama de actividades, desarrolla el flujo de ejecución de la aplicación.

En el diagrama expresado en la Figura 48 se relatan con mayor detalle la ejecución de la función ‘*MPCh derive*’ presentada en el apartado 4.1 y se une con el modelo funcional del Capítulo 3 . También se integran al diagrama de actividades las funciones auxiliares.

4.3 Diagrama de clases

Para una mayor comprensión de los diferentes diagramas de secuencias expuestos en el siguiente apartado, primero se expone el diagrama de clases (Figura 49) que se ha desarrollado para esta aplicación. En él se plasman tanto las clases que construyen el modelo como las clases auxiliares.

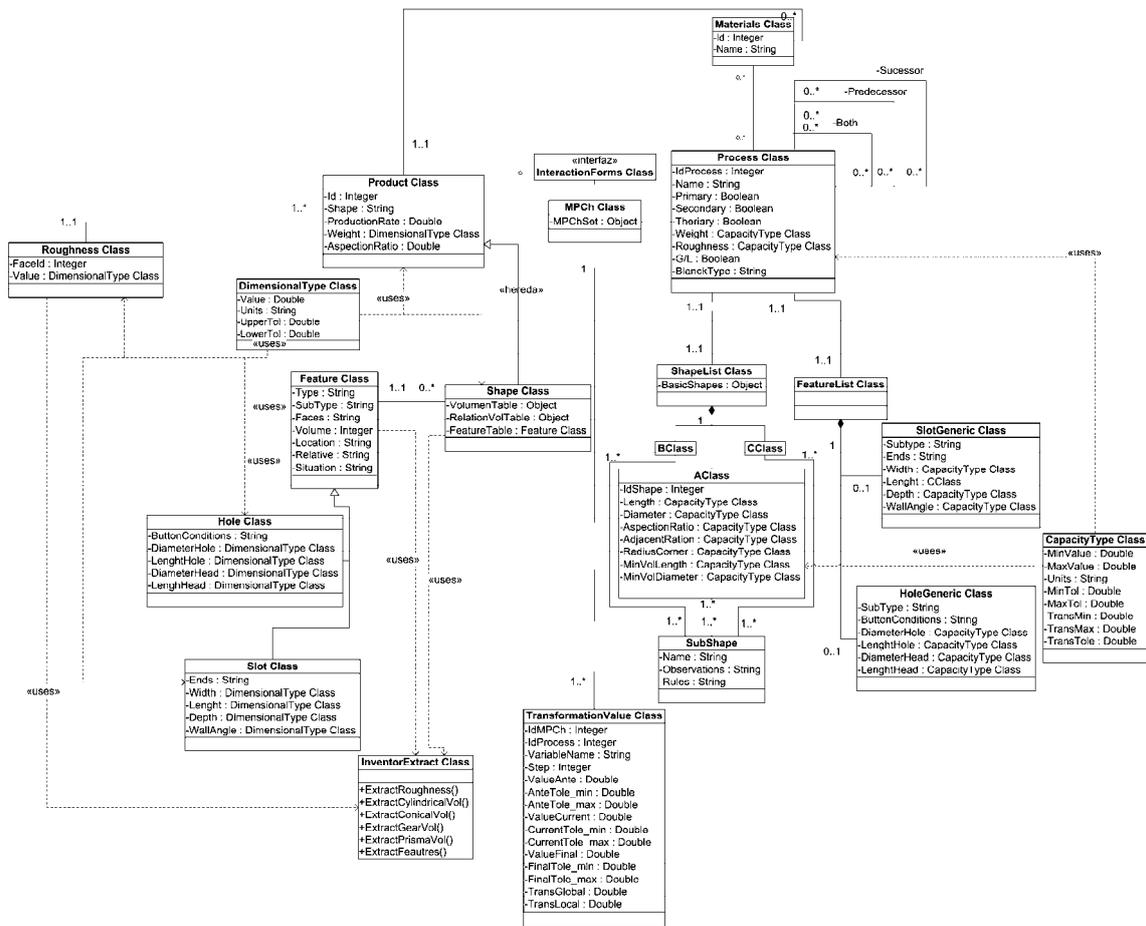


Figura 49 – Diagrama de clases, completo.

En la parte superior de la Figura 49 se localizan los 2 polos del modelo: la clase *product* y la clase *process*; unidos por la clase *MPCh* que gestiona la elaboración de las cadenas y que interactúa con el usuario a través de la clase *InteractionForms*. Esta clase *InteractionForms* alberga los formularios y elementos visuales con los que permitir la comunicación entre ambos elementos.

Ambas partes, a grandes rasgos, gestionan información similar debido a que se debe comparar información entre ellas. Aunque la naturaleza de los datos

almacenados difieren, ya que por parte del producto se almacena datos específicos (ej.: la altura de la pieza o la rugosidad para una cara de la pieza) y por parte del proceso se almacena datos agregados (ej.: los valores de altura máxima y mínima o el rango de rugosidades imprimidas), se lleva a cabo la comparación entre las partes.

Centrando la atención en la clase *Product* (Figura 50) se observan las diversas clases que gestionan la información de diseño recogida y prevista en la modelización (apartado 3.2.1.1). Por ello se han estructurado las siguientes clases: La clase *Product* para almacenar la información general de la pieza. La clase *Shape* tanto para almacenar la descripción de la forma como las dimensiones. La clase *Feature* gestiona la información general de las características geométricas y la información específica de ellas se almacena en clases aisladas. Esta clase está conectada con la clase *Shape*. La clase *Roughness* almacena las diferentes rugosidades tanto la general para toda la pieza como las propias de cada cara. La clase *Material* lista los materiales disponibles para elaborar la pieza. La clase *DimensionType* estructura la información para definir una dimensión del producto y la clase *InventorExtract* implementa las funciones para extraer los valores del modelo CAD.

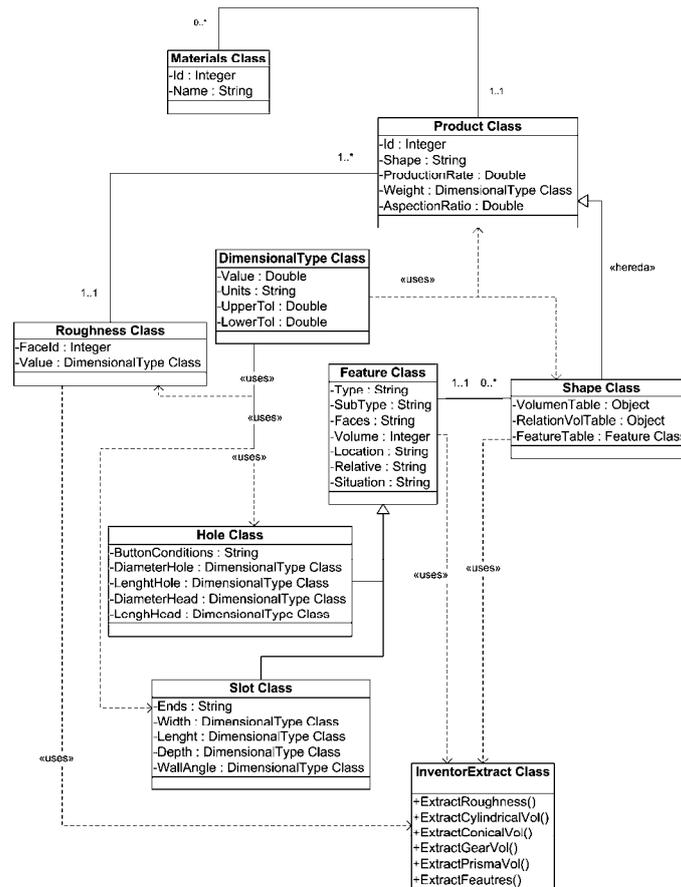


Figura 50 – Visualización de las clases vinculadas con la clase Producto.

Si nos centramos en la clase *Process* (Figura 51) se observan las diversas clases que gestionan la información de los procesos de fabricación, prevista en la

modelización (apartado 3.1). Para esta parte del modelo se comentarán las diferencias respecto a las clases presentada en el polo del producto. La clase *Process* se vincula a si misma tres veces (como *sucesor*, *both* y *predecesor*) para representar la regla de secuencia de cada proceso. La clase *ShapeList* alberga el conjunto de formas que pueden realizar los procesos, así como también la descripción dimensional para cada tipología: revolución (A), prismáticas (B) o chapa (C). En este diagrama, se detallan los atributos que definirán dimensionalmente una pieza tipo revolución (A). La clase *CapacityType* estructura la información para definir las dimensiones máximas permitidas como la capacidad del proceso para transformar la dimensión concreta. Para los procesos la gestión de las características geométrica se organiza con una clase genérica *FeatureList* que enlaza el proceso con las características geométricas definidas. Para cada una de las características geométricas definida se crea una clase propia (*SlotGeneric* y *HoleGeneric*) en donde se almacenará desde la dimensión más pequeña a la de mayor tamaño que el proceso puede realizar de ella.

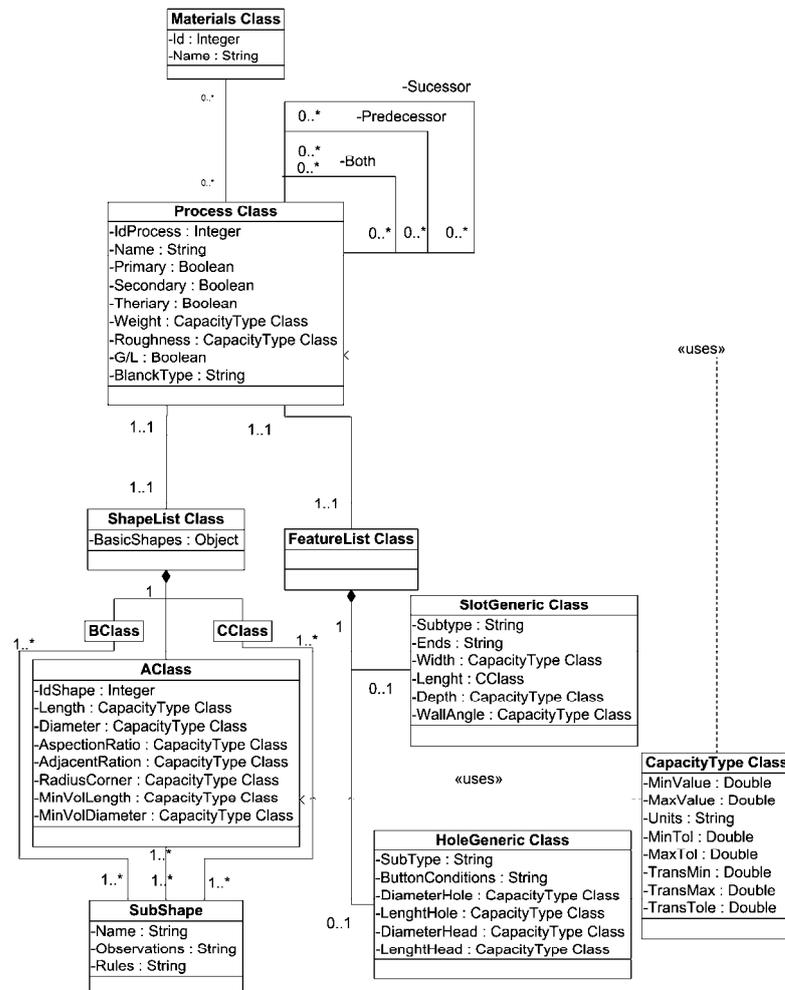


Figura 51 – Visualización de las clases vinculadas con la clase Process

4.4 Diagrama de secuencias

Hasta este momento se ha analizado la aplicación desde el punto de vista estático para estructurar informáticamente el conjunto de datos identificados en los modelos IDEFØ (Capítulo 3). En este apartado, mediante los diagramas de secuencia, se estudiará las interrelaciones temporales entre las clases para realizar el análisis de derivación de la cadena de procesos.

4.4.1 Análisis del producto

En el diagrama de la Figura 52 se refleja la transmisión de la información y las clases que interviene para capturar la información de diseño, concretamente los valores de dicha información del producto considerado. El proceso empieza cuando el usuario arranca la aplicación a través el mensaje ‘*Make MPCCh request*’. Una vez arrancada la aplicación será esta quien interrogue tanto al usuario como al sistema CAD para obtener la información de diseño que usará para confeccionar las cadenas de procesos de fabricación. En la obtención de esta información de diseño se realiza de forma pautada.

Este diagrama también muestra la inicialización de la aplicación y la introducción de la descripción de la forma. La aplicación establece una pauta para realizar la descripción de la forma. Siguiendo lo propuesto en el apartado 3.2.1.1 se ha analizado la clasificación de Swift & Booker para obtener los aspectos claves que describen la forma, como son: número de volúmenes en que se divide la pieza, tipología de los volúmenes, relaciones de vecindad entre los volúmenes establecidos o las características geométricas existentes. Al completar esta descripción analítica se podrá establecer a qué forma básica pertenece de la clasificación de Swift & Booker.

Una vez inicializados los flujos *Shape description* y *Shape select*, se inicializa la clase *Shape* de manera condicionada a estos flujos. La clase *Shape* se rellena de los valores dimensionales para acotar la pieza mediante el bucle dimensiones (marcado con el cuadrado ‘*For each dimension*’ – Figura 52). Para cada iteración del bucle se muestra al usuario, a través de la clase *InventorExtract*, que muestra la dimensión que ha de seleccionar y este a su vez devuelve el elemento del CAD que alberga el valor para la dimensión. El elemento CAD seleccionado será manipulado por la clase *InventorExtract* para extraer el valor y devolverlo como resultado a la petición hecha por la clase *Shape*. Será la clase *Shape* quien almacenará el valor obtenido por cada dimensión.

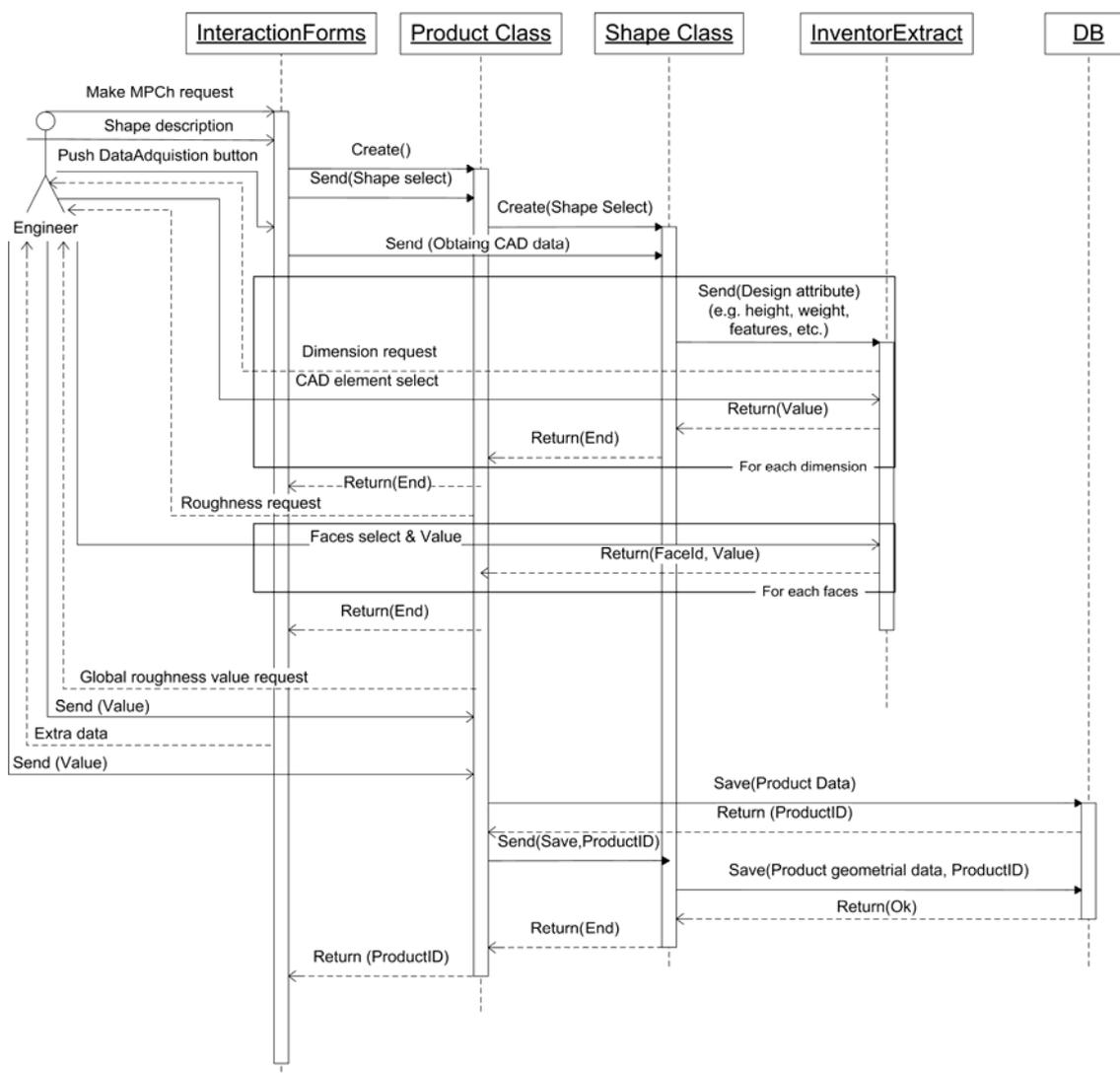


Figura 52 – Secuencia de mensajes para recopilar la información de diseño.

Después de finalizar la adquisición de la información dimensión, la clase *Product* prosigue con la recopilación del resto de atributos que completan el resumen de la pieza. Al finalizar la recopilación de la información de diseño, esta será presentada al usuario por medio del formulario de la clase *InteractionForms*. Una vez la información ha sido validada por el usuario, este lanzará el evento ‘*Almacenar*’, que a su vez dispara el procedimiento de volcado de la información sobre la clase *BD* que vincula la aplicación con la base de datos creada.

4.4.2 Algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación

Como se ha determinado en los diagramas IDEF0, el algoritmo de derivación tiene dos fases: una de inicialización de la cadena, y, una segunda que rellena la

cadena hasta completar el diseño. Los siguientes apartados muestran la secuencia de mensajes entre las clases para realizar la totalidad del algoritmo.

4.4.2.1 Inicialización del algoritmo

El algoritmo empieza a ejecutarse según la secuencia mostrada en el diagrama de la Figura 53. Después que el usuario lance el evento ‘*Calculate MPCh*’, este evento es recogido por la clase *MPCh* quien recoge la clase *Product* que ya contiene la información de diseño y pide a la clase *Process* que elabore un vector de procesos que puedan ocupar el primer eslabón de la cadena. Para elaborar el vector, la clase *MPCh*, a través de ‘*Filter1*’, selecciona los procesos dependiendo de la entrada de esta llamada compuesta por los atributos material, forma y categoría. El ‘*Filter2*’ valida los atributos requeridos, opcionales y características geométricas disponibles en el resumen de diseño para cada uno de los procesos del vector. Si se recibe una respuesta positiva del ‘*Filter2*’, la función ‘*Evaluar transformación*’ calculará la modificación aplicable por el proceso y creará la lista de atributos resueltos y no resueltos, que se devolverá a la clase *Shape* como resultados. Por su parte la clase *Shape* devolverá los candidatos a ocupar el primer eslabón a la clase *MPCh*.

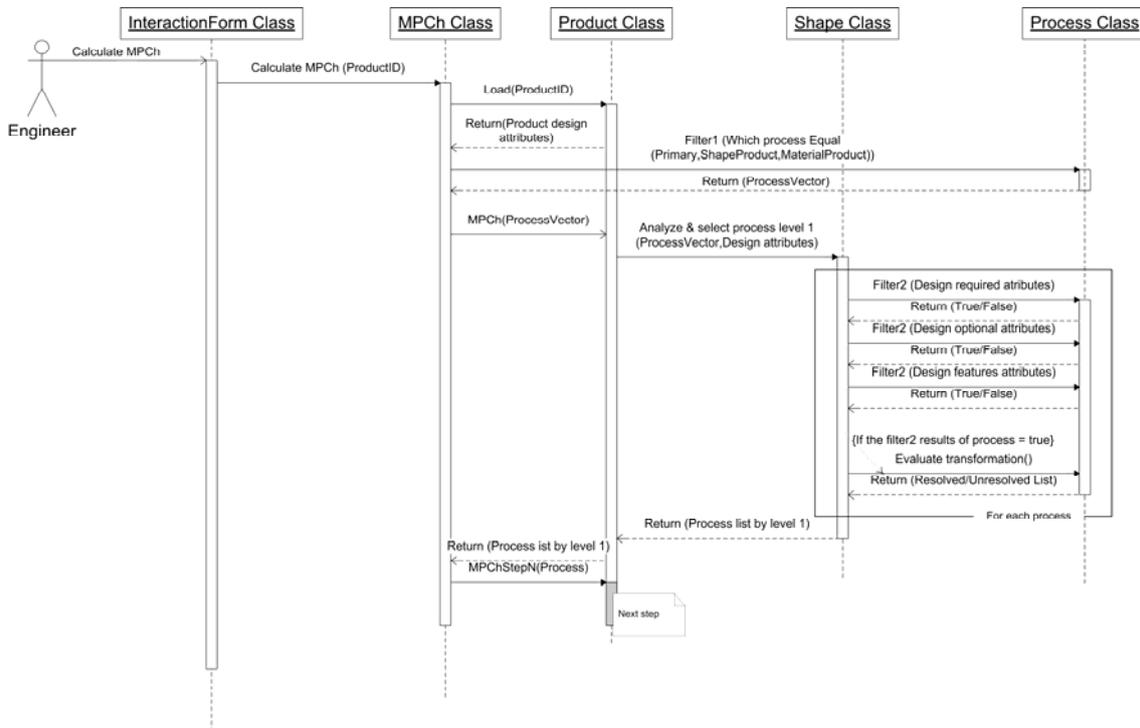


Figura 53 – Secuencia de mensajes para establecer el primer eslabón de la cadena.

4.4.2.2 Complementar las cadenas de procesos de fabricación

La clase *MPCh* proseguirá la construcción de las diferentes cadenas derivables, según el diagrama de la Figura 54. Primero se inicializará con la lista de procesos de fabricación nivel 1 obtenida en la fase de inicialización (Figura 53). A continuación, de forma secuencial la clase *MPCh* irá creando el resto de la cadena, de forma que se enviará a la clase *Product* el mensaje ‘*MPChStepN*’ con el siguiente proceso a analizar.

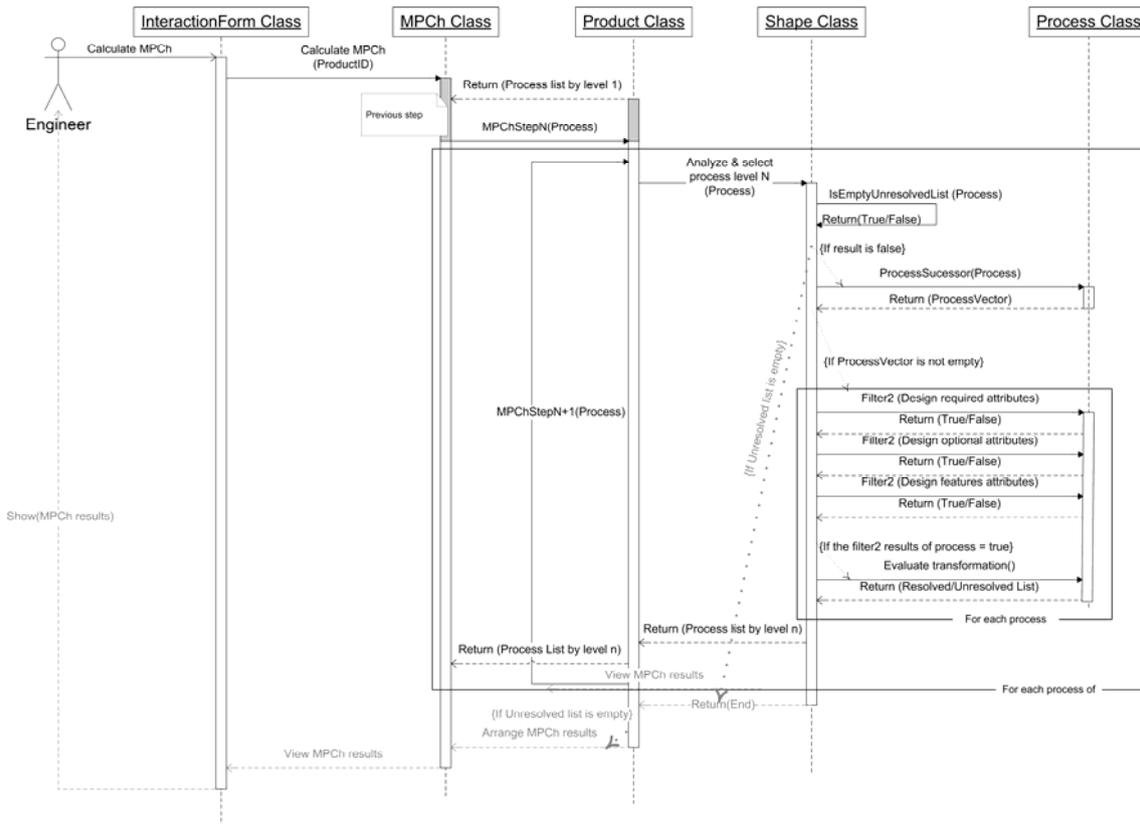


Figura 54 – Secuencia de mensajes para establecer los sucesivos eslabones de la cadena.

Este análisis, llevado a cabo por la clase *Shape*, primero comprueba si con la porción de cadena de procesos de fabricación identificada es suficiente, con la función ‘*IsEmptyUnresolvedList*’ obteniendo así el valor de cierto o de falso según el resultado de escrutar el número de atributos etiquetados con el valor *unresolved*.

Si el resultado de la función es ‘cierto’ indica que ya se han alcanzado los valores de diseño, con lo cual se puede parar la ejecución del algoritmo (flechas grises del diagrama – Figura 54). De lo contrario, cuando el resultado de la función es ‘falso’, indica que se debe de continuar incluyendo procesos (flechas negras del diagrama – Figura 54). De forma que se continuará iterando para el último proceso de fabricación incluido en la cadena y se pedirá a la clase *Process* que elabore el vector de procesos que puede ir detrás (*successors*) del último considerado. Si hay procesos sucesores, para cada uno de ellos se le aplicará el procedimiento de

validación realizado por *filter2*, ya explicado en el apartado anterior. Esta función se irá repitiendo de forma recursiva hasta el punto en que la lista únicamente contenga atributos resueltos, lo que indicará que la cadena ha sido completada.

En este punto, la clase *Shape* devuelve la finalización de la función por medio del mensaje *Return* a la clase *Product*. Esta reenvía a la clase *MPCh* el mensaje *Arrange MPCh results* para que la clase *MPCh* estructure los procesos de fabricación de una forma inteligible para el usuario.

Finalmente se devuelve el control al usuario, quien analizará los resultados obtenidos en esta ejecución y valorará la necesidad de realizar cambios sobre el modelo CAD para ajustarse a una cadena de procesos de fabricación. En tal caso el usuario tiene la posibilidad de volver a ejecutar el algoritmo con el objetivo de ver el efecto de estas modificaciones sobre las nuevas cadenas de procesos obtenidas.

Capítulo 5 Descripción y validación de la aplicación

En este capítulo se presenta la aplicación obtenida e integrada en un sistema CAD. En una primera parte se exponen la recolección de los valores para los atributos a través de los formularios de la aplicación así como de los procedimientos para reciclar la información contenida en el modelo CAD, concluye esta parte del capítulo con el detalle de los resultados a obtener. En la segunda parte de este capítulo se exponen dos casos de estudio, en donde se presenta el caso de estudio, los valores utilizados y los resultados obtenidos por la aplicación.

5.1 Descripción de la solución

La aplicación presentada en esta tesis ha sido integrada en un sistema CAD, específicamente *Autodesk Inventor® profesional 2008*. Para la codificación de dicha aplicación se usó el lenguaje de programación *Visual Basic para aplicaciones® versión 6.5*, que ya está incorporado al sistema CAD escogido, y para el almacenamiento de la información de diseño y de fabricación se ha utilizado una base de datos creada con *Access® 2007*.

La aplicación está estructurada en tres bloques: información de diseño, información de procesos de fabricación y el algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación.

5.1.1 Información de diseño

Como se ha visto en los capítulos 3 y 4 existe una gran diversidad de información de diseño que se debe capturar para poder confeccionar las cadenas de manera más automatizada. La captura de esta información, por parte de la aplicación, se lleva a cabo mediante el formulario “Introducción de los datos de diseño” presentado en la Figura 55.

Este formulario se organiza en tres zonas principales. Una primera zona alberga la descripción de la forma del modelo CAD, una segunda zona alberga la descripción dimensional del modelo CAD y una tercera zona completa la descripción del diseño mediante información adicional.

Process Chain derivation method - Introduce product data

Part Shape Description

Please, introduce the geometrical data from left side to right side

of volumes

Table of volumes

#Vol	Type	Axis

Table of relationship between volumes

Relationship Code	Contact volume		Contact surface		Axis	
	Left	Right	Left	Right	Location	Relative pc

Table of features

#Featur	#Volum	Type	Axis		Situatio
			Location	Relative	

Main axis? X axis Y axis Z axis

Dimensional Description

Undetermined

Cylinder Volumes | Cone Volumes | Gears Volumes | Prism Volumes | Features | Roughness

Face	Value	Units
General 0		Ignore

To edit the values of a dimension, double click on the appropriate cell

Extra data

	Minimal Value	Maximal Value	Units
Production	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="Units"/>
General Tolerance	<input type="text" value="-0,1"/>	<input type="text" value="0,1"/>	
Weight	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Material	<input type="text"/>		

Figura 55 – Formulario “Introducción de los datos de diseño”.

5.1.1.1 Descripción de la forma del modelo CAD

La descripción de la forma del modelo CAD se realiza mediante dos etapas: en la primera etapa se define la forma básica del diseño y en la segunda etapa se especifica el conjunto de características geométricas que refinan y detallan el diseño (Figura 56).

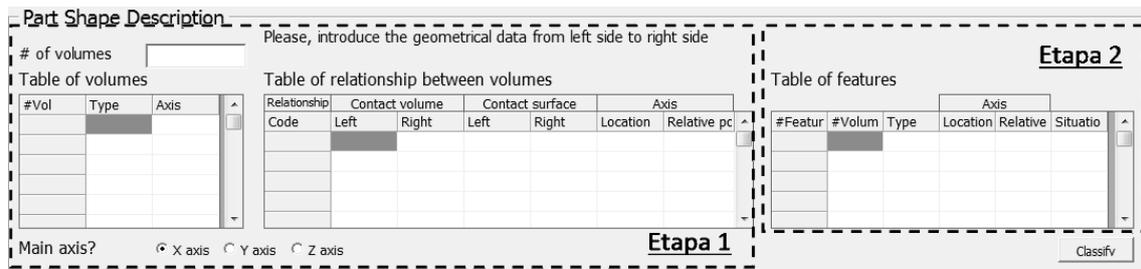


Figura 56 – Zona ‘Descripción de la forma del modelo CAD’.

Etapa 1: Descripción de la forma básica del diseño

La forma básica de un diseño se describe en base a la fragmentación en volúmenes del modelo CAD. Por lo que el usuario deberá especificar el conjunto de volúmenes en los que se puede fragmentar el modelo CAD y las relaciones que existen entre dichos volúmenes. La Figura 57 muestra un modelo CAD dividido en dos volúmenes. El término “*volumen*” se define como la porción mínima de superficie en donde no hay alteraciones en sus dimensiones.

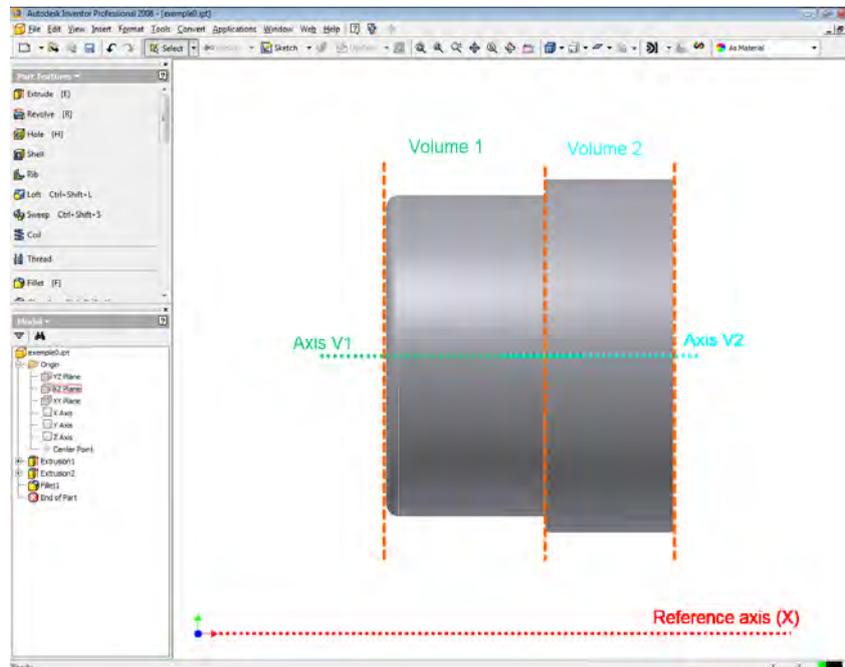


Figura 57 – Modelo CAD segmentado en volúmenes.

Para almacenar esta representación volumétrica del modelo, la aplicación propone dos tablas (Figura 56): *la tabla de volúmenes* y *la tabla de relaciones entre volúmenes*.

La *tabla de volúmenes* permite almacenar la lista de volúmenes en los que se ha dividido la pieza y su correspondiente orientación. Por el momento la aplicación incluye cuatro *tipos de volúmenes* diferentes: cilindro, tronco de cono (abreviado como cono), engranaje y prisma. Cada uno de ellos incorpora un *eje de referencia* que permite especificar su orientación respecto al eje principal del modelo (X, Y o Z). Por ejemplo en la Figura 57 se puede observar que la figura se compone de dos volúmenes cilíndricos, los ejes relacionados con cada uno de ellos y el eje principal del modelo en sí.

La *tabla de relación entre volúmenes* permite especificar las relaciones existentes entre los volúmenes del modelo CAD que son contiguos. Para formalizar una relación hay que indicar: *los volúmenes de contacto*, *las superficies de contacto* y *el eje*. Siendo:

- *Volúmenes de contacto*: representan el volumen izquierdo y derecho que configuran la relación, y se introducen usando el código numérico indicado en la *tabla de volúmenes*.
- *Superficies de contacto*: indican cómo se unen los dos volúmenes entre sí. Las superficies de contacto pueden ser de tres tipos: cara circular, cara cilíndrica o cara prismática. La Tabla 4 muestra las diferentes combinaciones de unión entre ellas.

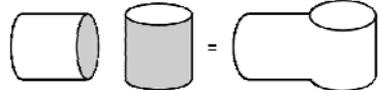
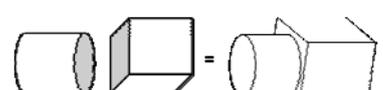
Combinación de caras	Esquema
Dos caras circulares	
Cara circular con cara cilíndrica	
Dos caras cilíndricas	
Cara circular con cara prismática	
Cara cilíndrica con cara prismática	

Tabla 4 – Relaciones entre las caras de los volúmenes contiguos.

- *Eje*: está relacionado con la orientación de ambos volúmenes y se define especificando dos atributos: la situación y la posición relativa. La *situación* entre los ejes de los dos volúmenes en contacto representa cómo están orientados y puede tomar el valor: paralelo, perpendicular o inclinado. Por otro lado, la posición relativa entre los dos ejes indica que desplazamiento hay entre los ejes y puede tomar el valor: alineados o desalineados, y en tal caso hay que especificar la posición relativa. Las posibles combinaciones entre ambos atributos se han esquematizado en la Tabla 5.

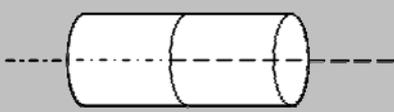
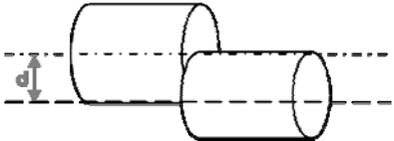
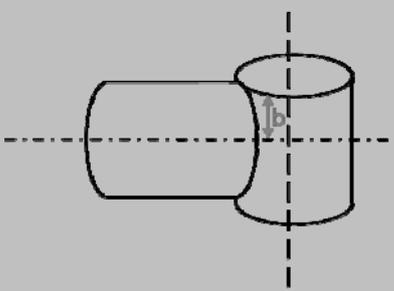
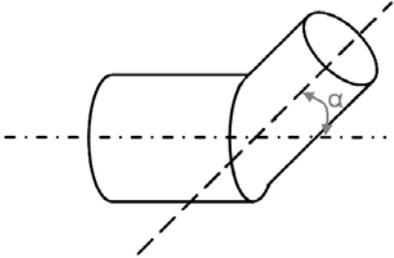
Combinación de ejes	Esquema
Ejes paralelos y alineados	
Ejes paralelos y no alineados con posición relativa entre ejes de valor "d"	
Eje perpendiculares con posición relativa entre cara y eje de valor "b"	
Ejes inclinados con posición relativa angular de valor "α"	

Tabla 5 – Combinaciones de los ejes de los volúmenes contiguos.

Durante la descripción de la forma básica el usuario debe especificar el ‘*eje de trabajo principal*’ que gobierna el modelo CAD. En la Figura 57 se marca dicho eje con color rojo.

Etapa 2: Descripción de las características de diseño

Esta descripción de la forma se complementa con características geométricas, a modo de modificadores de un volumen determinado. La ***tabla características***

geométricas (Figura 56) incluye los atributos necesarios para su especificación. Estos atributos son los siguientes:

- *Numero de característica geométrica*: representa el identificador de la característica.
- *Numero de volumen*: indica el volumen donde se circunscribe la característica, considerando el identificador de volumen incluido en la *tabla de volúmenes* (Figura 56). Si una característica geométrica está circunscrita en más de un volumen, se establece como referencia el volumen situado más a la izquierda según el eje principal.
- *Tipología*: permite especificar cuál es el tipo de característica geométrica contenida en la forma básica. Esta tipología se basa en la ISO 10303-224 (International Organization for Standardization, 2000), la cual incluye una amplia variedad de tipos de características geométricas y su correspondiente especificación dimensional. La elección de estructurar las características geométricas por medio de la ISO 10303-224 ha sido debido a que el estándar fue creado con el objetivo de proveer de un mecanismo neutral capaz de describir las características y permitir el intercambio de información entre cualquier sistema de información. En concreto la versión 224 representa la información necesaria para producir partes mecánicas. Sin embargo hasta el momento se han implementado dos características: agujero y ranura. Estas dos características han sido seleccionadas porque permiten manipular diversos escenarios de diseño e iniciar a la parametrización de las especificaciones incluidas en la ISO con la vinculación a un sistema CAD.
- *Eje*: está relacionado con la orientación de la característica en relación al volumen donde está incluida y se define especificando dos atributos: la situación y la posición relativa. La *situación* indica la relación del eje principal de la característica con respecto al eje del volumen, siendo su valor: paralelo, perpendicular o inclinado. La *posición relativa* indica cómo están situados dichos ejes, los cuales pueden estar: alineados o desalineados y con posición relativa; del mismo modo que la *tabla de las combinaciones de los ejes de los volúmenes* (Tabla 5).

- *Situación de la característica:* indica si la característica geométrica altera la superficie del volumen o por el contrario altera el interior del mismo. Por ejemplo, un agujero se ubica en el interior, mientras que una ranura se puede ubicar en el exterior.

5.1.1.2 Descripción dimensional

La zona de la ‘descripción dimensional’ (Figura 58) permite capturar las dimensiones de la forma básica y de las características geométricas que configuran el modelo y que se ha introducido en la sección anterior. Considerando que dicha forma (representada con un conjunto de volúmenes) y características son diferentes para cada caso concreto, esta zona se adapta automáticamente mediante la aparición de diferentes pestañas. En concreto, la totalidad de las pestañas son (Figura 58): *cilindros, conos, engranajes, prismas, características geométricas y rugosidad*.

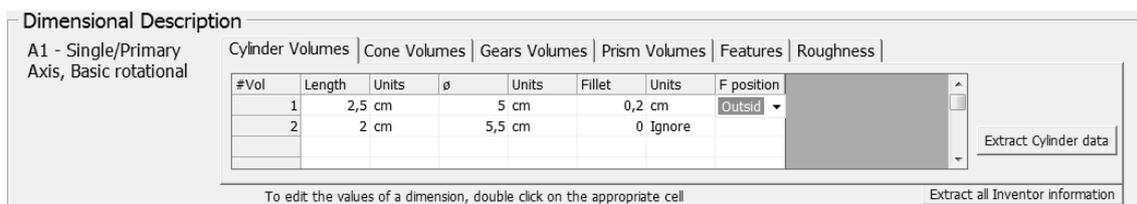


Figura 58 – Zona ‘Descripción dimensional’, volúmenes.

Cada tipología de volumen lleva asociada una pestaña diferente, de forma que si un modelo contienen todos los tipos de volúmenes, le aparecerán las cuatro pestañas (Figura 58): *cilindros, conos, engranajes, prismas*. Evidentemente, la información dimensional que los representa es diferente para cada uno de los tipos. La Tabla 6 muestra los atributos dimensionales que describen cada tipo de volumen. Cada atributo dimensional establecido en esta descripción se compone de: *un valor numérico, la unidad de medida y las tolerancias dimensionales*. Sin embargo, para una mayor legibilidad del formulario únicamente se visualiza valor y unidad de cada dimensión. La Figura 58 muestra las dimensiones de dos volúmenes cilíndricos asociados con el modelo CAD mostrado en la Figura 57.

Tipo de volumen	Atributos
Cilindro	Diámetro Longitud Radio de canto
Cono	Diámetro superior Diámetro inferior Longitud Radio de canto
Engranaje	Diámetro Longitud Numero de dientes Tipología de dientes Longitud del diente Radio de canto
Prisma	Alto Ancho Profundidad Radio de canto

Tabla 6 – Atributos que formalizan los volúmenes.

El atributo “radio del canto”, que aparece caracterizado en todos los tipos de volúmenes, delimita cómo se termina los extremos de cada volumen. Este atributo también se define mediante un valor y sus correspondientes unidades, aunque también hay que especificar su concavidad (Figura 59). La Figura 59(a) muestra una pieza con el extremo redondeado mediante un radio del canto convexo o exterior. Por otro lado la Figura 59(b) muestra una pieza donde la unión entre dos volúmenes se ha realizado mediante un radio del canto cóncavo o interior. Este atributo se considera opcional, de forma que puede o no considerarse durante la configuración de cadenas de procesos. Para ello hay que especificar el valor ‘*Ignorar*’. El valor ‘*Ignorar*’ en un atributo le indica al algoritmo de derivación que no lo debe tener en consideración durante la confección de las cadenas. Este valor no tiene carácter universal, es decir que no todos los atributos expuestos en el formulario de “*introducción de los datos de diseño*” podrán albergarlo, sino que únicamente aquellos atributos que aumentan el detalle de la información de diseño y por esta razón han sido declarados como opcionales en el resumen.

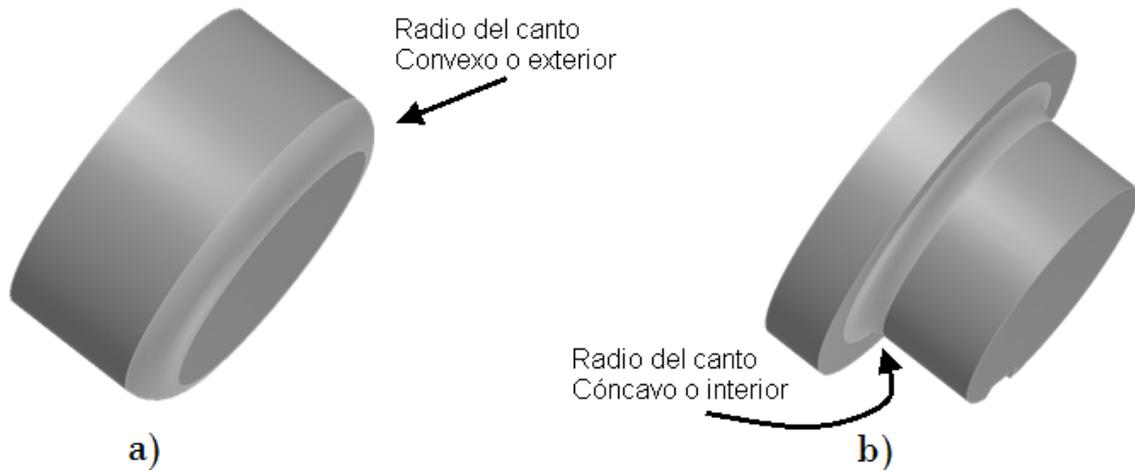


Figura 59 – Concavidad del radio de canto.

Cuando el modelo contiene características geométricas, en la zona de ‘descripción dimensional’ también aparece la pestaña *características* (Figura 60). Como se puede observar esta pestaña incluye tantas sub-pestañas como tipos de características contiene el modelo. De forma que la Figura 60 muestra las dos características incluidas en un modelo dado: agujero y ranura.

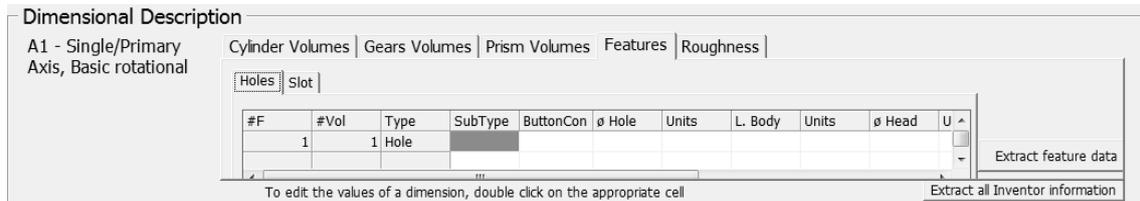


Figura 60 – Zona ‘Descripción dimensional’, características geométricas.

Para definir la característica agujero se han considerado las opciones ofrecidas por el sistema CAD junto con las definidas en la ISO. De forma que se definen tres tipos de agujeros (Figura 61): el taladrado, el escariado y el avellanado. Los atributos para definir cada uno de ellos se han tomado de la ISO 10303 (International Organization for Standardization, 2000). El taladrado se define mediante el diámetro, la altura del agujero y la terminación del agujero (agujero pasante o agujero ciego con terminación cónica, plana o esférica). El escariado y el avellanado se añaden los atributos para definir la cabeza del agujero (el diámetro y la altura).

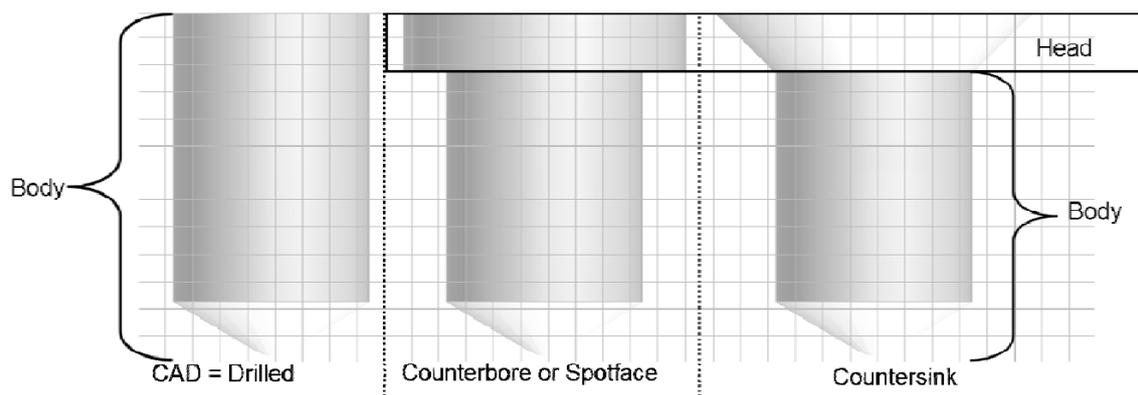


Figura 61 – Tipologías de agujeros.

Para la característica ranura (Figura 62), según la ISO 10303 (International Organization for Standardization, 2000) se identifican tres tipos o perfiles diferentes: rectangular, forma de U o con radio y Woodruff. Estas distinciones de las ranuras se almacenan en el formulario dentro del atributo subtipo. No obstante en esta tesis únicamente se ha parametrizado la ranura rectangular, se ha definido con los atributos: altura, ancho, profundidad, el ángulo de la pared y el tipo de finalización (plano, abierto, redondeado).

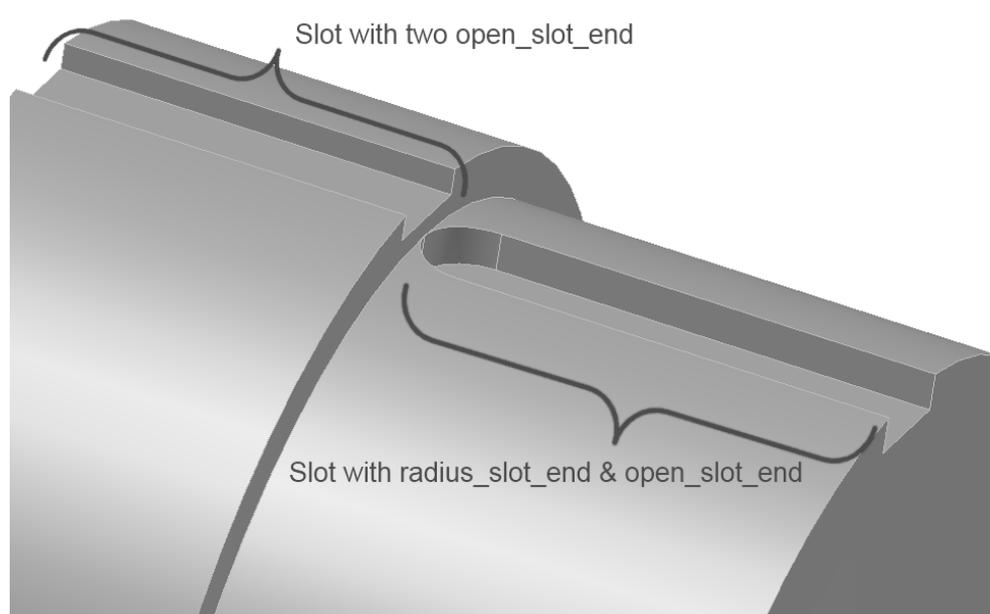


Figura 62 – Ejemplo de ranuras, fuente: (International Organization for Standardization, 2000).

La última pestaña de la zona de ‘descripción dimensional’ corresponde con la pestaña de *rugosidad*. Esta pestaña permite especificar el conjunto de rugosidades asignadas a la pieza (Figura 63). En la primera fila de esta pestaña se establece la rugosidad general de la pieza (etiquetado como ‘General 0’). Las siguientes filas permiten definir valores concretos de rugosidad asociados a superficies concretas de la pieza. Para este segundo bloque de filas es necesario identificar la cara de la pieza

y añadirle el valor. Para identificar la cara del modelo se usar el identificador asignado por el sistema CAD junto con la etiqueta ‘face’, y posteriormente se le añadirá el valor de la rugosidad. La Figura 63 muestra un ejemplo con una rugosidad general (general 0) y una rugosidad propia para la cara 6 de la pieza.

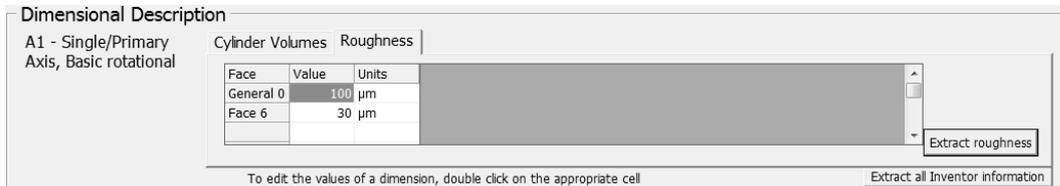


Figura 63 – Zona ‘Descripción dimensional’, rugosidad.

5.1.1.3 Información adicional

En la zona inferior del formulario “*Introducción de los datos de diseño*” (Figura 64) se incluyen atributos restantes de diseño, que no hacen referencia al aspecto de forma o dimensión. Siendo estos los atributos de: “producción”, “tolerancia general”, “material” y “peso”.

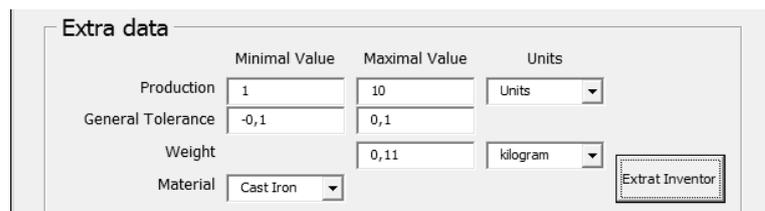


Figura 64 – Zona ‘información adicional’.

El atributo “producción” permite especificar la cantidad de piezas que se pretenden producir a lo largo del año.

El atributo “Tolerancia general” permite asignar a las dimensiones una tolerancia genérica a seguir exceptuando aquellas dimensiones que ya la incorporen en la zona ‘descripción dimensional’.

El atributo “Material” indica con qué material se realizará la pieza. Los sistemas CAD incorporan una lista de materiales ya definidos, los cuales se pueden asociar a cada modelo. En el caso de estar asociado la aplicación lo leerá e incorporará al resumen automáticamente.

El atributo “Peso” da una referencia de la masa de la pieza. Al tener un material asignado los sistemas CAD calculan una serie de parámetros, entre ellos el peso, y la aplicación lo podrá extraer.

5.1.1.4 Extracción de la información del modelo CAD

Aunque la información establecida en el formulario “*introducción de los datos de diseño*” puede ser introducida manualmente por el usuario, al desarrollar una aplicación integrada en un sistema CAD tiene como ventaja que se pueden extraer los valores dimensionales y parte de la información adicional del modelo CAD e importarlos directamente en sus respectivas celdas dentro del formulario.

Esta extracción directa de valores es posible gracias a que la mayoría de la información dimensional y adicional ya ha sido definida durante la creación del modelo CAD. De modo que la aplicación tiene programadas unas funciones que permiten procesar la información dimensional del modelo y obtener el valor final. Estas funciones de la aplicación se apoyan en la información contenida en el modelo y en otras funciones adicionales contenidas en el sistema CAD, por ejemplo funciones para capturar medidas. El procedimiento de **extracción directa** de la información dimensional es semiautomático y consiste en escanear las pestañas presentadas en el apartado 5.1.1.2.

La Figura 65 muestra cómo se extrae la información dimensional de uno de los volúmenes cilíndricos del modelo presentado en la Figura 57. Tras pulsar el botón ‘*extraer datos*’ del formulario de la Figura 58 se activa automáticamente el formulario “*Información para la extracción de los datos*” situado en la parte superior izquierda de la Figura 65, y pide al usuario que seleccione el volumen 1 a través del árbol de características. En este caso el ‘*volumen 1*’ se corresponde con la ‘*extrusión 1*’. Esta selección de la característica reacciona sobre el modelo CAD marcando los límites de la característica con líneas discontinuas. A continuación, de forma automática, el sistema reconoce los atributos que lo configuran (“diámetro” y “longitud”) y proporciona los valores propios (valor, unidad y tolerancia) asociados con el ‘*volumen 1*’ del modelo. En este mismo formulario el valor de “radio del canto” del volumen se captura separadamente del volumen ya que está definido por otra característica del árbol.

Toda la información recogida por el procedimiento de **extracción directa** se escribe (de abajo hacia arriba) en el formulario “*Información para la extracción de los datos*” para facilitar al rastreo de los datos recogidos.

Este procedimiento para extraer los datos aprovecha el potencial que ofrece el Autodesk Inventor. Este sistema CAD desarrolla el concepto *técnica de modelado paramétrico basada en características* y consiste en asociar parámetros claves a características geométricas. El concepto de características geométricas aproxima el proceso de diseño y la fabricación más que el modelado por sólidos. En un modelo paramétrico, las partes del modelo se modificarán automáticamente cuando el diseño es refinado (Shih, 2007). Al hacer coincidir el concepto de características de diseño

con el concepto de volumen utilizado en esta tesis se podrán unir las diversas dimensiones demandas por el algoritmo con la información dimensión almacenada en las características de diseño.

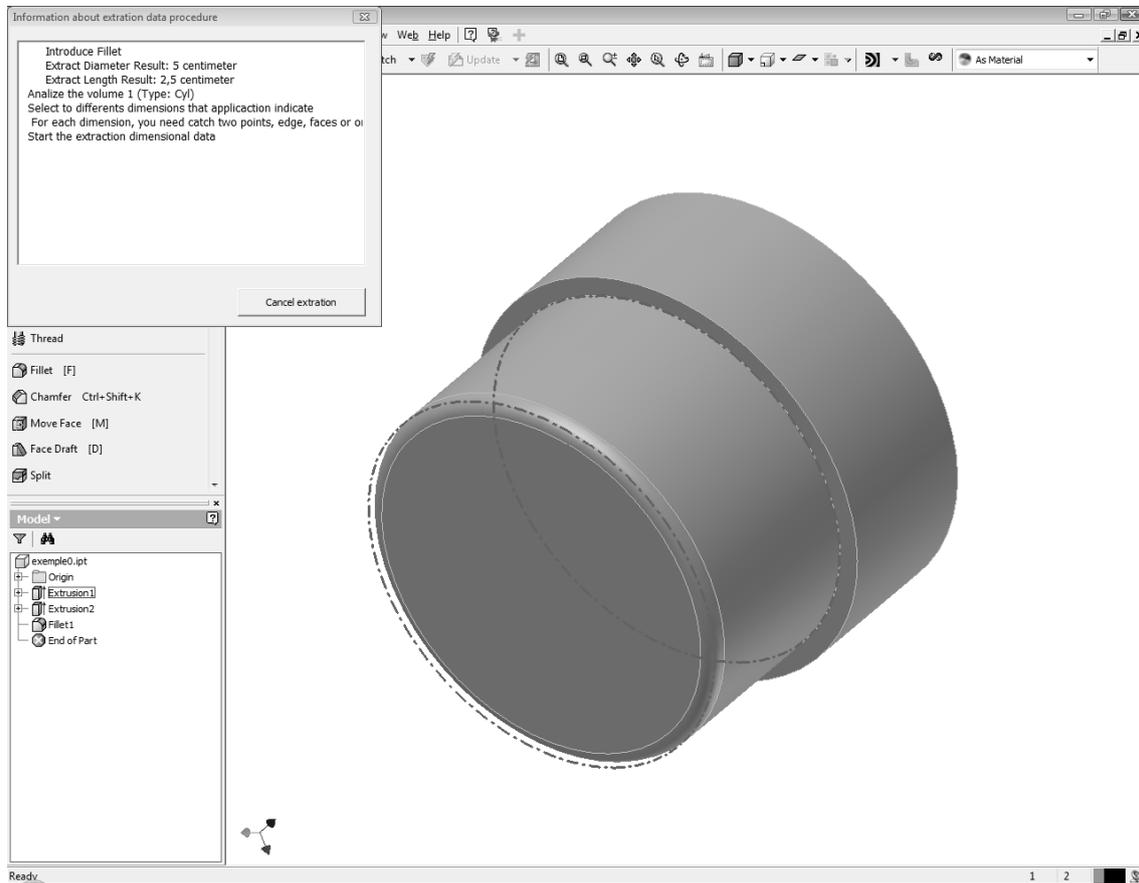


Figura 65 – Ejemplo de la extracción de datos dimensionales: con el método de extracción directa.

Aunque la aplicación desarrollada opera de forma muy automatizada cuando el diseño se realiza mediante la técnica de modelado paramétrico basado en características, la aplicación también puede usarse cuando un diseño se realiza usando la técnica de geometría construida por sólidos (CSG). Para este segundo panorama, la aplicación adapta el procedimiento de extracción directa de datos, permitiendo extraer los valores usando como referencia distancias entre elementos gráficos, como puntos, segmentos o caras. Es decir, lo que se en esta tesis se ha denominado el proceso de **extracción indirecta**. La Figura 66 muestra el proceso de extracción de la información dimensional mediante esta vía.

Para ello, el mismo formulario “*Información para la extracción de los datos*” interacciona con el usuario para indicarle qué parámetros debe seleccionar. Si el usuario no selecciona ninguna característica del árbol de características de diseño del modelo CAD (situado en la parte inferior izquierda de la Figura 65) y selecciona

directamente sobre la geometría del modelo, el sistema entenderá que el usuario desea capturar la información dimensional de forma indirecta. De modo que el sistema le proporcionará los diferentes atributos que configuran el volumen y el usuario extraerá los valores especificando fronteras geométricas que limitan cada atributo. Por ejemplo, para determinar la longitud del volumen 2 el usuario puede marcar las dos caras que limitan este atributo, cuyo contorno está más marcado en la Figura 66. Con estos dos elementos gráficos la aplicación calcula la distancia y la asigna como valor para la longitud, estableciendo como unidad de medida centímetros. El resultado, al igual que con la vía anterior, es mostrado de nuevo en el formulario “*Información para la extracción de los datos*”.

Para extraer dimensiones de atributos de forma indirecta la aplicación permite seleccionar: puntos, segmentos, caras o combinaciones entre ellas, y siempre se obtiene la distancia mínima entre los dos elementos seleccionados. Sin embargo, no todas las dimensiones incluidas en el formulario se obtendrán de forma tan directa sino que en algunos casos se aplicará operaciones matemáticas para asimilar información del modelo CAD con la correspondiente dimensión demandada o para reducir el número de selecciones necesarias para establecerla. Un ejemplo del uso de operaciones para establecer el valor de una dimensión, se encuentra en el cálculo del diámetro para un volumen cilíndrico. Para realizar el cálculo el usuario seleccionará la cara que imprime el diámetro al volumen, de ella se extraerá el punto central y un punto situado encima del borde de la cara para calcular el radio. Este primer resultado se multiplicará por dos para obtener el resultado final e introducirlo como diámetro del ‘*volumen 2*’ en este caso.

Al igual que en el caso anterior, toda la información recogida por el procedimiento de extracción indirecta se escribe (de abajo hacia arriba) en el formulario “*Información para la extracción de los datos*” para facilitar la rastreabilidad de los datos recogidos.

Al finalizar la recolección de datos que rellenan el formulario “*Introducción de los datos de diseño*”, por cualquiera de los dos métodos presentados, se almacenará mediante el botón ‘*guardar*’ (Figura 67) en la base de datos que acompaña a la aplicación. Esta acción permite al usuario recuperar los valores con los que ha trabajado el algoritmo de derivación para obtener las diversas cadenas de procesos de fabricación.

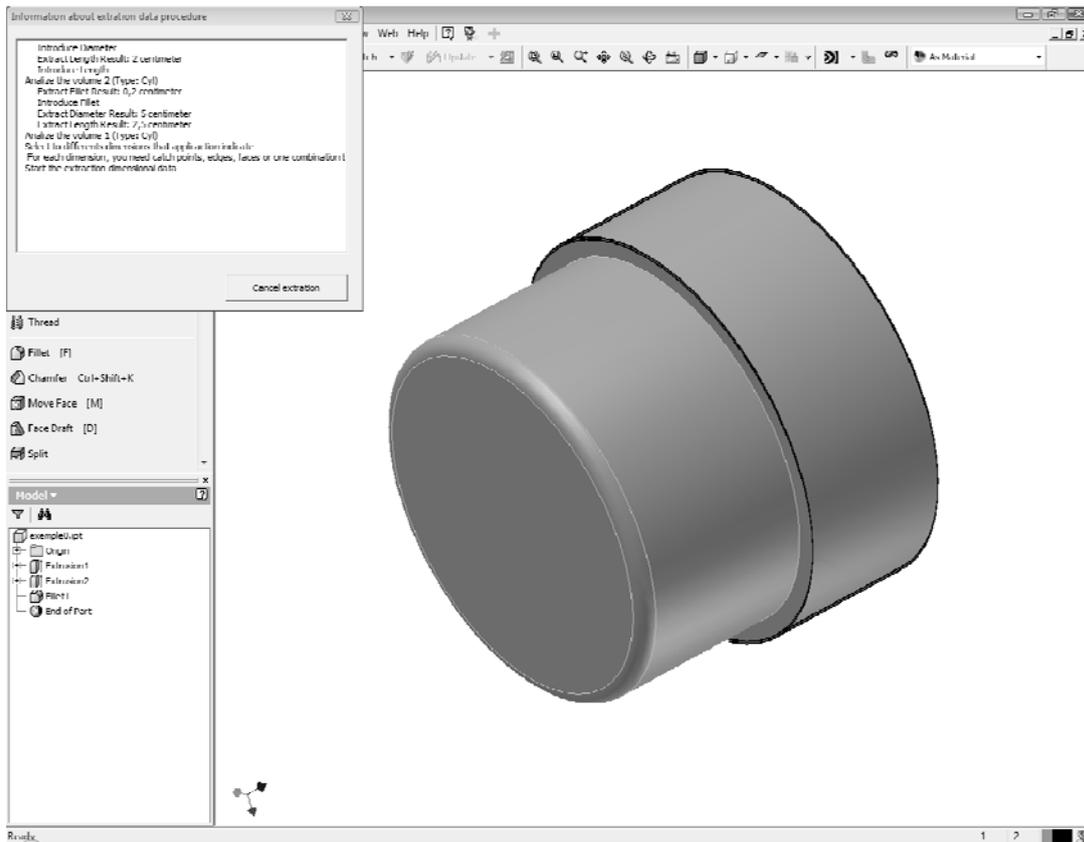


Figura 66 – Ejemplo de extracción de datos dimensionales: con el método de extracción indirecta.

Process Chain derivation method - Introduce product data

Part Shape Description

Please, introduce the geometrical data from left side to right side

of volumes: 2

Table of volumes

#Vol	Type	Axis
1	Cylinder	X
2	Cylinder	X

Table of relationship between volumes

Relationship Code	Contact volume		Contact surface		Axis	
	Left	Right	Left	Right	Location	Relative position
A	1	2	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned

Table of features

#Featur	#Volum	Type	Axis		
			Location	Relative	Situation

Main axis? X axis Y axis Z axis Classify

Dimensional Description

A1 - Single/Primary Axis, Basic rotational

Face	Value	Units
General 0	100	µm
Face 6	30	µm

Extract roughness

To edit the values of a dimension, double click on the appropriate cell Extract all Inventor information

Extra data

	Minimal Value	Maximal Value	Units
Production	1	10	Units
General Tolerance	-0,1	0,1	
Weight		0,699	kilogram
Material	Cast Iron		

Extract Inventor

Save

Figura 67 – Formulario “Introducción de los datos de diseño”, datos introducidos.

5.1.2 Información de los procesos de fabricación

El segundo bloque que conforma la solución adoptada es la información de los procesos de fabricación, que tal y como se comentó en el Capítulo 3 incluye: información del proceso de fabricación (restricciones y capacidades de transformación), reglas de secuenciación y clasificación de los procesos. Esta información se gestiona a través del formulario de “*Procesos de fabricación*” (Figura 68), el cual está implementado sobre una base de datos Access® que gestiona la información referente a los procesos de fabricación usados por el algoritmo de derivación. Su estructura sigue lo propuesto en el Capítulo 4 .

El formulario de “*Procesos de fabricación*” (Figura 68) presenta la información de procesos repartida en diversas tablas para que el usuario disponga de una visión global de la capacidad del proceso de fabricación. Este formulario está dividido en seis zonas diferentes.

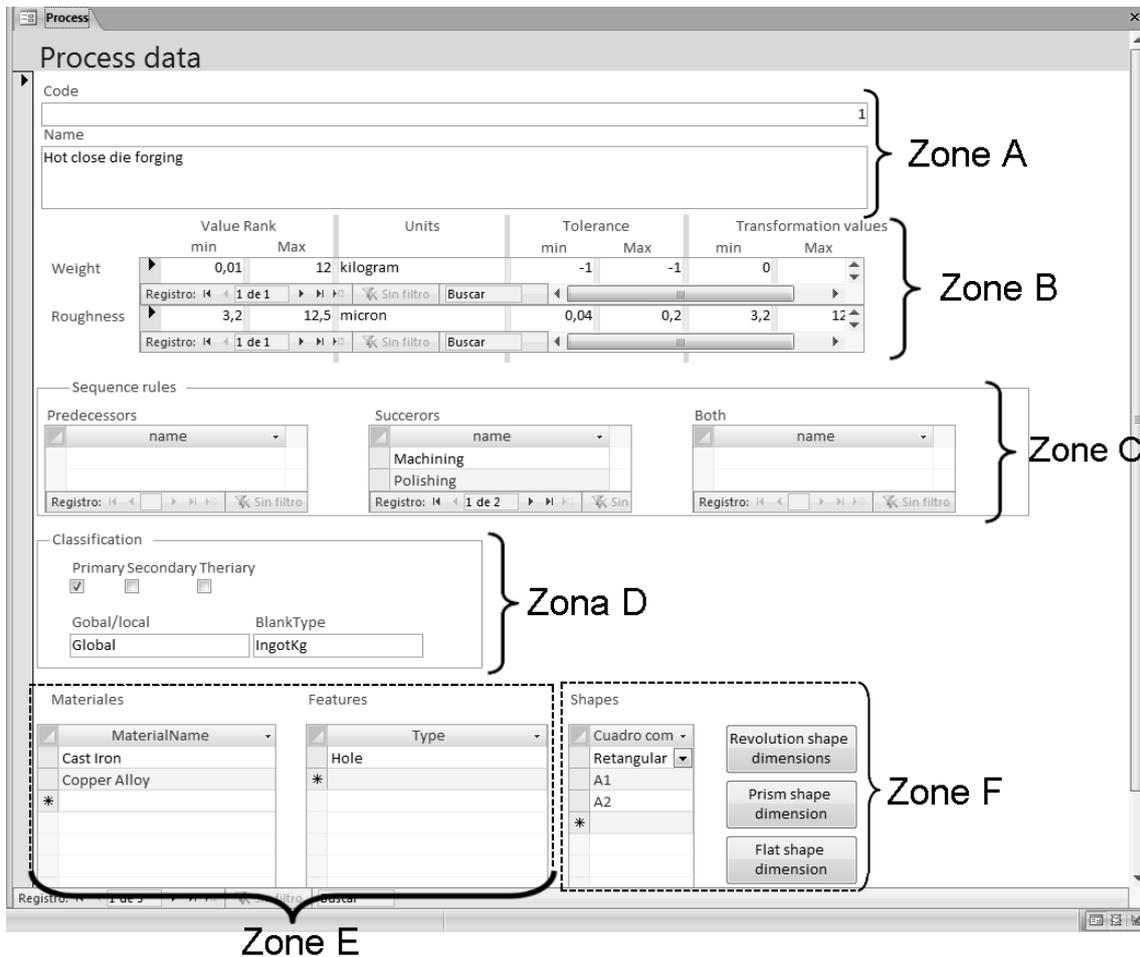


Figura 68 – Formulario “Procesos de fabricación”.

- **Zona A:** alberga información identificativa del proceso de fabricación, como el identificador del proceso y su nombre.

- *Zona B*: incluye las restricciones relacionadas con “peso” y “rugosidad” que el proceso es capaz de conseguir en una pieza. Ambas restricciones de esta zona son de tipo numérico y para almacenar restricciones de este tipo se ha optado por definir las mediante: el rango de valor del atributo, el rango de tolerancia y el rango de la capacidad transformación y la unidad de medida que escala el valor. Cada rango se define con un valor máximo y un valor mínimo.
- *Zona C*: almacena las reglas de secuencia expuestas en el apartado 3.1. Para ello se debe identificar la posición que ocupa cada uno de los procesos almacenados en el sistema en relación al proceso de fabricación analizado, con la finalidad de confeccionar las tres listas: antecesores, sucesores e indiferentes, según su relación con el proceso analizado.
- *Zona D*: especifica cómo se puede clasificar el proceso de fabricación (primario, secundario y/o terciario) según cómo altera el proceso la pieza que fabrica y el estado del material de partida.

Se considera que los procesos de fabricación pueden alterar las piezas de dos formas diferentes: global o local. Cuando un proceso altera la pieza de forma global significa que el proceso modifica todas las caras de la pieza a la vez, por ejemplo el proceso de ‘forja en caliente de matriz cerrada’, mientras que cuando lo hace de forma local el proceso puede modificar partes o caras aisladas en la pieza, como es el caso del ‘mecanizado’.

El estado del material de partida que precisa cada proceso puede ser: material fundido, material en polvo, material en lingotes (dando preferencia al peso o al volumen) o preforma de la pieza.

- *Zona E*: muestra las restricciones del proceso de fabricación en relación a los materiales y a las características geométricas. En cada relación únicamente se visualiza el título del material o característica. Para los materiales el resto de información (como por ejemplo: densidad, conductividad térmica, módulo de Young,...) está vinculada a la disponible en el sistema CAD. Respeto a las características geométricas en el formulario “*Procesos de fabricación*” únicamente se detallan los nombres de las características geométricas. Esta limitación

se ha establecido para reducir el volumen de información no esencial y hacer el formulario más legible y atractivo.

Para acceder a la información no mostrada de las características geométricas, hay que seleccionar la característica la cual se quiera visualizar y se abrirá un nuevo formulario con la información detallada de la misma. Por ejemplo la Figura 69 muestra la información detallada para el proceso ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ y la característica agujero.

	Value Rank		Units	Tolerance		Transformation values		
	min	Max		min	Max	min	Max	
Length body	1	10	centimeter	0,04	0,2	1	10	0,04
Diameter body	1	11	centimeter	0,04	0,2	1	10	0,04
Length head	1	10	centimeter	0,04	0,2	1	10	0,04
Diameter head	1	11	centimeter	0,04	0,2	1	10	0,04

Figura 69 – Restricciones dimensionales de la característica ‘agujero’ para el proceso de ‘forjado en caliente de matriz cerrada’.

- **Zona F:** muestra la vinculación entre el proceso de fabricación y las formas básicas de la clasificación de Swift & Booker (Swift y Booker, 2003) que puede desarrollar. En la *tabla de formas* se muestran los diferentes niveles de complejidad que puede fabricar cada proceso analizado (para el caso de forjado en caliente de matriz cerrada se establece A1 y A2). Además también se puede relacionar la forma básica con las dimensiones que puede afrontar el proceso para cada uno de los tres niveles principales de la clasificación: revolución (A), prismática (B) y de chapa (C). Por ejemplo la Figura 70 muestra las restricciones dimensionales asociadas con el conjunto de formas de revolución (A) para el proceso de forjado en caliente de matriz cerrada. Estas restricciones incluyen: dimensiones físicas que restringen la categoría de formas, como la longitud, el diámetro, el radio de canto, y proporciones entre diversas dimensiones, como el ratio de sección adyacente y el ratio de aspecto. El ratio de sección adyacente es la diferencia de espesor entre dos volúmenes contiguos (Esawi y Ashby,

2000) mientras que el ratio de aspecto es la proporción entre la longitud máxima con el espesor donde se ubica dicha longitud (Esawi y Ashby, 2000);

	Value Rank		Units	Tolerance		Transformation values		
	min	Max		min	Max	min	Max	
Length	0,3	25	centimeter	0,04	0,2	1	12,5	0,1
Diameter	0,3	25	centimeter	0,04	0,2	0,5	12,5	0,1
Aspect ratio	1	5	Indeterminate	0	0	0	0	0
Adjacent ratio	1	3	Indeterminate	0	0	0	0	0
Corner radii	0,2	999	centimeter	0,04	0,2	1	12,5	0,1

Figura 70 – Restricciones dimensionales de la formas de revolución para el proceso de forjado en caliente de matriz cerrada

5.1.3 Método de derivación de cadenas de procesos de fabricación

El tercer bloque que compone la aplicación es el algoritmo de derivación de cadenas de procesos de fabricación. Desde el punto de vista del usuario, la interacción en este bloque es bastante baja, pues consiste básicamente en observar los resultados. No obstante, desde el punto de vista de programación, este bloque constituye el grueso del código de la aplicación, lo cual está ampliamente detallado a lo largo del Capítulo 4.

El usuario puede ver los resultados proporcionados por el algoritmo a través del formulario “*Resultados del algoritmo*”, Figura 71. Esta figura muestra las cadenas de procesos de fabricación que pueden realizar el modelo CAD mostrado, así como también se incluyen algunos eslabones alternativos que aunque no resultan cadenas viables pueden ser consideradas siempre y cuando se adapten algunos de los atributos opcionales al modelo CAD. Esta inclusión persigue contemplar un marco más amplio de alternativas de fabricación, dando más información al ingeniero para valorar la inclusión, según la disponibilidad de su entorno, de unos u otros procesos de fabricación en la planificación de la fabricación.

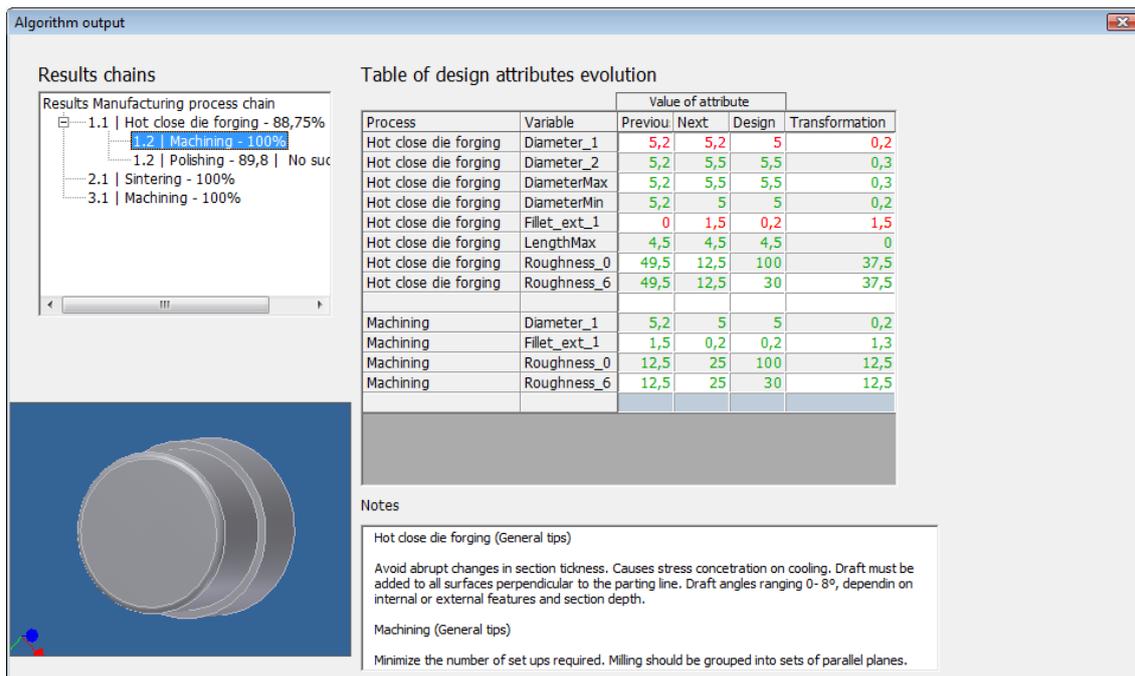


Figura 71 – Formulario “Resultados del algoritmo”.

Los resultados presentados en el formulario de la Figura 71 se dividen en tres zonas: a) la zona de cadenas resultantes, b) la tabla de la evolución de los atributos de diseño y c) la zona de notas de fabricación.

- a) *La zona de ‘cadenas resultantes’* muestra los procesos de fabricación que componen cada cadena de procesos de fabricación, en forma de árbol jerárquico. Cada cadena se identifica mediante la incorporación de un prefijo al nombre del proceso. El prefijo está formado por dos valores numéricos separados por un punto. El primero de ellos es el código de la cadena, mientras que segundo representa el eslabón o posición que ocupa el proceso dentro de la cadena. Por ejemplo *1.2 Mecanizado* significa que el proceso forma parte de la primera cadena y ocupa el segundo eslabón dentro de la misma.

Cada uno de los eslabones tiene al final una valoración, la cual ha sido obtenida tras aplicar el criterio técnico, explicado en el apartado 3.2.1.2. La interpretación del criterio técnico escogido es cuanto menor sea el porcentaje que aparece en cada eslabón indica que hay un mayor número de atributos sin resolver. Cuando el valor del último eslabón de la cadena es del 100% indica que la cadena ha concluido. Se utiliza los porcentajes para facilitar el entendimiento del criterio por parte del usuario, no obstante como más adelante se verá un desglose

de los cálculos para obtener el porcentaje resultante del criterio técnico. Toda aquella cadena que en su último eslabón no alcance el valor de 100%, significa que dicha cadena no es capaz de concluir la pieza en su totalidad. En este caso, como se ha comentado anteriormente, el usuario puede considerar la posibilidad de modificar algún atributo de diseño, adaptándolo así su fabricabilidad a dicha cadena.

- b) La *‘tabla de la evolución de los atributos’* muestra cómo se van consiguiendo los atributos de diseño del modelo CAD en los diferentes eslabones de las cadenas resultantes hasta llegar al eslabón final. En la tabla se muestra para cada atributo cuál es su valor antes de entrar en el proceso (*valor previo*), su valor a la salida (*valor siguiente*), el valor objetivo (*valor de diseño*) y la *transformación* realizada durante el proceso en dicho atributo. También se remarca en color verde los atributos que ya han sido alcanzados y en color rojo los que no se han conseguido aún. En la Figura 71 se muestra los valores de los atributos para la cadena de *‘forjado en caliente de matriz cerrada’* y *‘mecanizado’*. En la figura se observa que los atributos están organizados en dos bloques; el primer de ellos muestra los atributos modificados por el primer eslabón *‘forjado en caliente de matriz cerrada’*, posteriormente aparece una línea en blanco, y finalmente se muestran los atributos modificados por el segundo eslabón *‘mecanizado’*.

Los nombres de los diferentes atributos mostrados en los resultados (columna *‘Variable’* - Figura 71) se componen del nombre del atributo (ej. diámetro) más la parte del modelo CAD sobre la que actúan (ej. volumen 1, cara 11). La combinación de ambas partes da resultados como *“diameter_1”* o *“roughness_6”*.

Para el proceso de *‘forjado en caliente de matriz cerrada’* se toma como material de partida un bruto cuyas dimensiones volumétricas se mantienen desde el inicio al final del proceso; debido a que en el proceso de forjado no hay ni arranque ni aportación de material por lo tanto el material sobrante en determinados volúmenes se utilizará para rellenar los volúmenes con falta de él. Para su cálculo se considera como fija la longitud final y se determina así un bruto

inferior al diámetro máximo (atributo “*DiameterMax*”). El proceso de ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ realiza todas las dimensiones propuestas, menos el atributo “radio de canto”, el cual no alcanza el valor de diseño. Por consiguiente, el diámetro al cual está vinculado queda alterado tendrá que ser modificado en el proceso siguiente. Por lo concerniente a la rugosidad, rugosidad general o ‘*rugosidad_0*’ como la específica a una cara determinada o ‘*rugosidad_6*’ obtienen el mismo valor, pues es un proceso global que modifica esta propiedad en su totalidad. El segundo proceso completa los atributos no concluidos por el forjado.

- c) La zona de ‘*notas*’ de fabricabilidad incorpora anotaciones adicionales para mejorar el modelo analizado en relación a su fabricación con cada proceso de la cadena.

5.2 Validación de la aplicación

Para concluir la explicación de la descripción de la aplicación se han incluido dos ejemplos de piezas mecánicas que permitirán la validación de la aplicación a nivel operativo. Estas dos piezas son un émbolo de vasos comunicantes y un portabrocas. Ambas piezas están en la fase de materialización del diseño y por ello se parte de un boceto realizado en CAD.

5.2.1 Caso de estudio 1: Émbolo de un sistema de vasos comunicantes

En esta sección se muestra el resultado de utilizar la aplicación desarrollada en esta tesis a un émbolo de un sistema de vasos comunicantes que forma parte de una mesa de extensión de polvo para sinterizado láser, Figura 72. Su función es presionar el líquido que impulsa la plataforma del dispensador de polvo. Esta pieza ha sido diseñada mediante el sistema CAD Autodesk Inventor® 2008 y se ha usado la aplicación desarrollada para determinar las posibles cadenas de fabricación que pueden fabricar dicho componente.

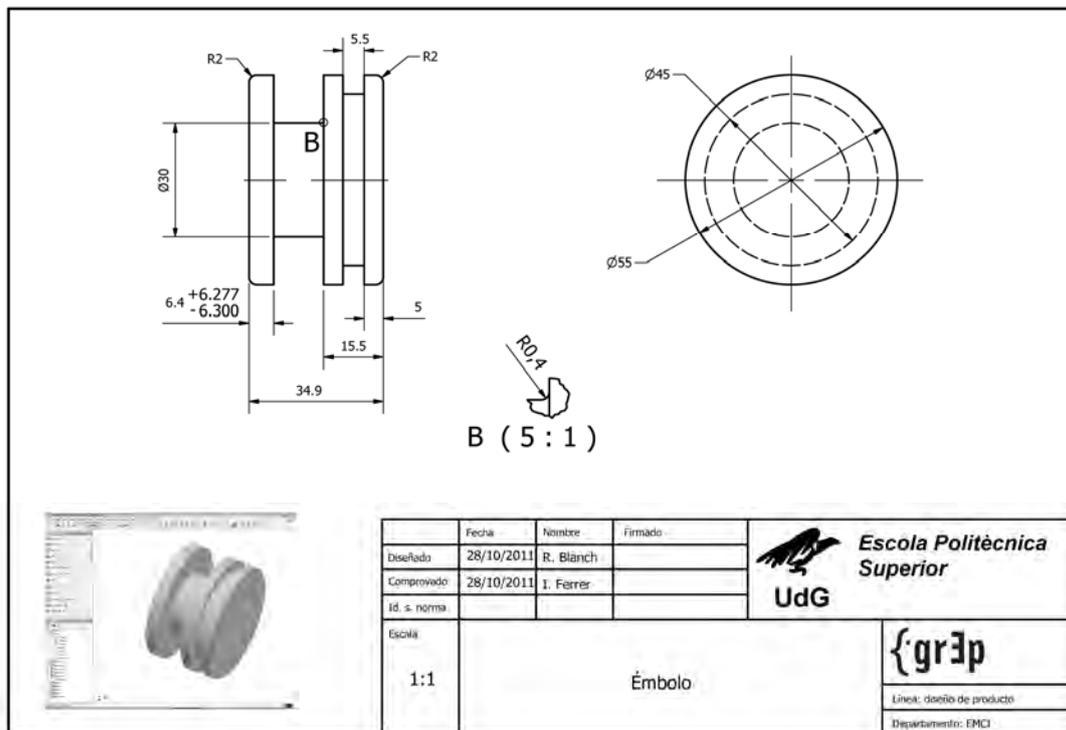


Figura 72 – Modelo CAD del émbolo, boceto.

Considerando la secuencia que se ha seguido durante la descripción de la aplicación (apartado 5.1), a continuación se muestran los diferentes pasos que se han seguido para resolver este primer caso de estudio que se presenta.

- **Paso 1.** El usuario ha dividido el modelo CAD en un conjunto de volúmenes. Concretamente se ha dividido en cinco volúmenes, los cuales muestra la Figura 73.

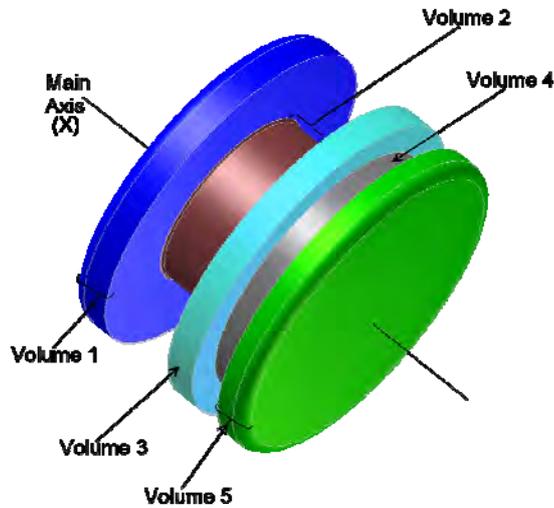


Figura 73 – Modelo CAD dividido en volúmenes.

- Paso 2. Se han introducido los cinco volúmenes y sus correspondientes relaciones en la zona de ‘Descripción de la forma del modelo CAD’. Como se observa en la *Tabla de volúmenes* de la Figura 74 todos los volúmenes son de tipo cilíndrico y su eje de referencia se corresponde con el eje X, el mismo que el eje principal del modelo CAD. Referente a la relación entre volúmenes todos ellos tienen como superficie de contacto caras circulares y tienen los ejes paralelos y alineados, tal y como se recoge en la *Tabla de relaciones entre volúmenes* de la Figura 74. El émbolo de estudio no contiene ninguna característica geométrica, por lo tanto la tabla correspondiente a esta información está vacía.

Process Chain derivation method - Introduce product data

Part Shape Description

of volumes: 5

Please, introduce the geometrical data from left side to right side

#Vol	T	ER
1	Cylinder	X
2	Cylinder	X
3	Cylinder	X
4	Cylinder	X
5	Cylinder	X

Relationship Code	Contact volume		Contact surface		Axis	
	Left	Right	Left	Right	Location	Relative position
a	1	2	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
b	2	3	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
c	3	4	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
d	4	5	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned

#Feature	#Volume	Type	Axis		
			Location	Relative	Situation

Main axis? X axis Y axis Z axis

Classify

Figura 74 – Zona descripción de la forma, valores del ejemplo.

- Paso 3. Activando el botón “clasificar” de la Figura 74, la zona ‘Descripción dimensional’ se reconfigura acorde con la información introducida en la etapa anterior. De forma que en esta zona se muestra la pestaña para *volúmenes cilíndricos*, pues todos los volúmenes de esta pieza son de este tipo, y la pestaña para almacenar la *rugosidad* (Figura 75).

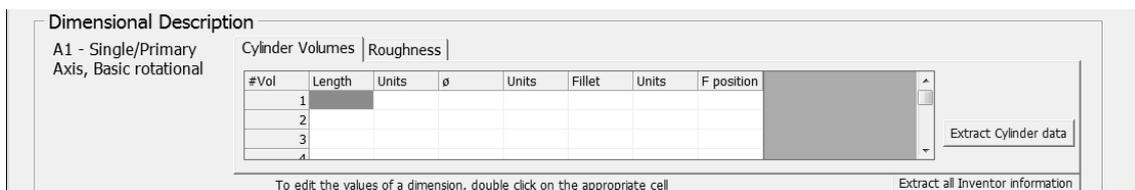


Figura 75 – Zona ‘descripción dimensional’, inicial.

Esta acción de “clasificar” también establece la correspondencia entre modelo CAD del émbolo y la clasificación de formas de Swift & Booker (Swift y Booker, 2003) implementadas en la aplicación. El resultado es que el émbolo ha sido clasificado como una pieza de revolución con un nivel de complejidad baja; del tipo A1. Esta clasificación es importante para elaborar, posteriormente, las cadenas de fabricación.

- Paso 4. Mediante el botón “*Extraer toda la información del Inventor*” se extrae directamente los datos dimensionales del Inventor para cada uno de los volúmenes que configuran el émbolo. La Figura 76 muestra el resultado de llevar a cabo dicha extracción siguiendo el procedimiento comentado en el apartado 5.1.1.4. Las características que acotan cada uno de los volúmenes están coloreadas en la Figura 76. El ‘*volumen 1*’ está constituido por la ‘*Extrusion 1*’, marcada en color rojo tanto en el árbol de características como en el modelo 3D, y por el ‘*Fillet 9*’, marcado en ambos lados con color naranja. En el formulario “*Information about extension data procedure*” se recogen los valores de la longitud y el diámetro del volumen, en color rojo, y el valor del radio de canto, en color naranja. El ‘*volumen 2*’ se compone de la ‘*Extrusion 2*’ (color azul) y del ‘*Fillet 10*’ (color verde). Y así sucesivamente para los volúmenes 3, 4 y 5, los cuales se corresponden con la ‘*Extrusion 3*’, ‘*Extrusion 4*’, ‘*Extrusion 5*’, respectivamente.

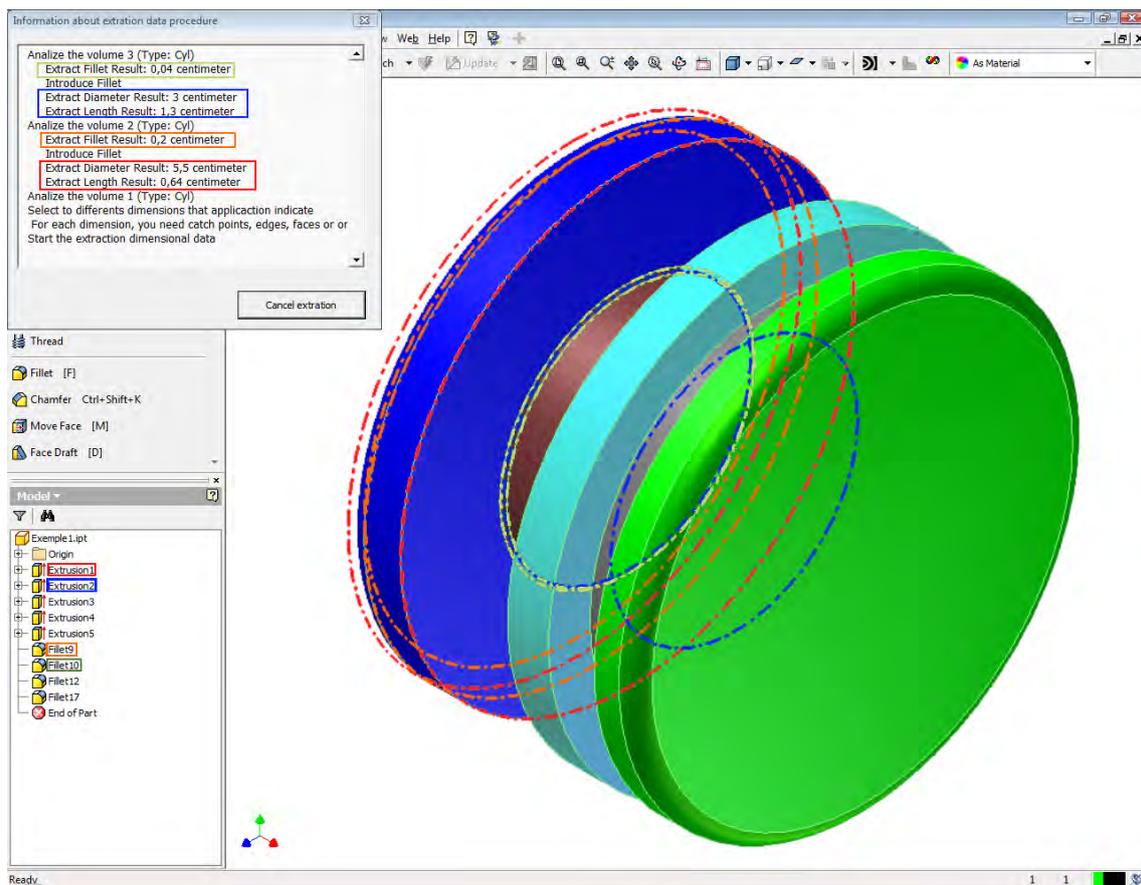


Figura 76 – Método de extracción directa, características seleccionadas.

La Figura 77 muestra el resultado final de los valores obtenidos en la extracción comentada y la Tabla 7 muestra una ampliación de dichos valores.

Dimensional Description						
A1 - Single/Primary Axis, Basic rotational						
Cylinder Volumes		Roughness				
#Vol	Length	Units	ø	Units	Fillet	F position
1	0,64	cm	5,5	cm	0,2	Outside
2	1,3	cm	3	cm	0,04	Inside
3	0,5	cm	5,5	cm	0	Ignore
4	0,55	cm	4,5	cm	0	Ignore

To edit the values of a dimension, double click on the appropriate cell

Extract all Inventor information

Figura 77 – Zona ‘descripción dimensional’, valores dimensionales.

Volumen	Color	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Radio (cm)	Posición
1	Azul	0,64	5,5	0,2	Exterior
2	Marón	1,3	3	0,04	Interior
3	Cían	0,5	5,5	–	
4	Gris	0,55	4,5	–	
5	Lima	0,5	5,5	–	

Tabla 7 – Tabla con los datos dimensiones y codificación de color de los diferentes volúmenes.

- Paso 5. Se ha introducido la información adicional del émbolo, como se muestra en la Figura 78 y ampliados en la Tabla 8. Los valores del material y del peso se han rellenado mediante el método de extracción directa ya que se encuentran introducidos en el modelo CAD (Figura 79), mientras que los campos de producción y tolerancia han sido introducidos manualmente.

Figura 78 – Zona ‘datos extra’, valores del ejemplo.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Producción	1 unidad	10 unidades
Tolerancia general	-0,1	0,1
Peso	0,153 kg	
Material	Aluminio	

Tabla 8 – Tabla con el resto de atributos de diseño considerados.

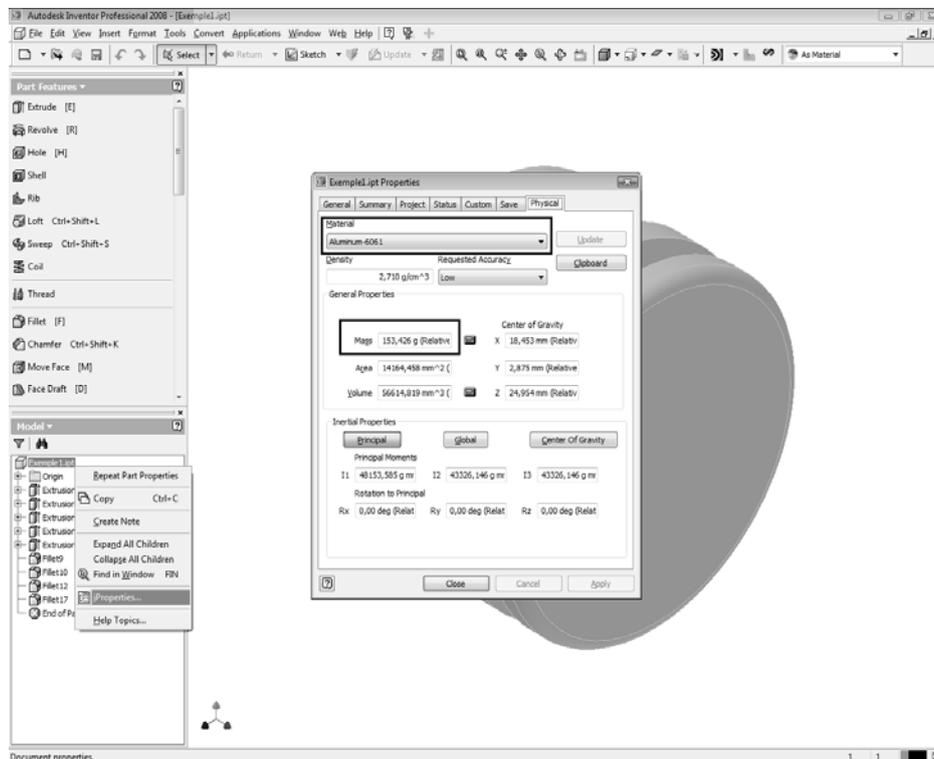


Figura 79 – Sistema CAD, propiedades del boceto.

- Paso 6. Cuando todo el formulario “*Introducción de los datos de diseño*” del caso del émbolo ya ha sido completado, tal y como se muestra en la Figura 80, se ejecuta el algoritmo que proporcionará las posibles cadenas de procesos que podrán fabricar el émbolo. Para ello es necesario accionar el botón ‘*Analizar la cadena de procesos de fabricación*’. Seguidamente la aplicación muestra las diferentes cadenas posibles, en “*resultados de cadenas*” (Figura 81), y para cada eslabón la historia y la situación en que se encuentra los atributos de diseño (*tabla de la evolución de los atributos de diseño*).

Part Shape Description
Please, introduce the geometrical data from left side to right side

of volumes: 5

#Vol	Type	Axis
1	Cylinder	X
2	Cylinder	X
3	Cylinder	X
4	Cylinder	X
5	Cylinder	X

Relationship Code	Contact volume		Contact surface		Axis		
	Left	Right	Left	Right	Location	Relative pc	
a	1	2	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned	
B		2	3	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
C		3	4	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
D		4	5	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned

#Featur	#Volum	Type	Location	Relative	Situatio

Main axis? X axis Y axis Z axis

Dimensional Description
A1 - Single/Primary Axis, Basic rotational

#Vol	Length	Units	φ	Units	Fillet	Units	F position	
1	0,64	cm		5,5	cm	0,2	cm	Outside
2	1,3	cm		3	cm	0,04	cm	Inside
3	0,5	cm		5,5	cm	0	Ignore	
4	0,55	cm		4,5	cm	0	Ignore	

Extra data

	Minimal Value	Maximal Value	Units
Production	1	10	Units
General Tolerance	-0,1	0,1	
Weight		0,153	kilogram
Material	Aluminum-60t		

Buttons: Save, Analyze manufacturing process chain, Classify, Extract Cylinder data, Extract all Inventor information, Extrat Inventor

Figura 80 – Formulario “*Introducción de los datos de diseño*”, datos introducidos.

Como se observa en la Figura 81 los resultados están compuestos por tres cadenas de procesos de fabricación: cadena 1: forjado en caliente de matriz ferrada – mecanizado – pulido; cadena 2: pulvimetalurgia – pulido; cadena 3: mecanizado – pulido.

A continuación se analizan la evolución de los atributos para cada una de ellas, mostrando los resultados en tablas adicionales para mejorar su visualización y facilitar la explicación. Las cadenas se exponen de forma ordenada considerando el criterio técnico obtenido para cada una de ellas.

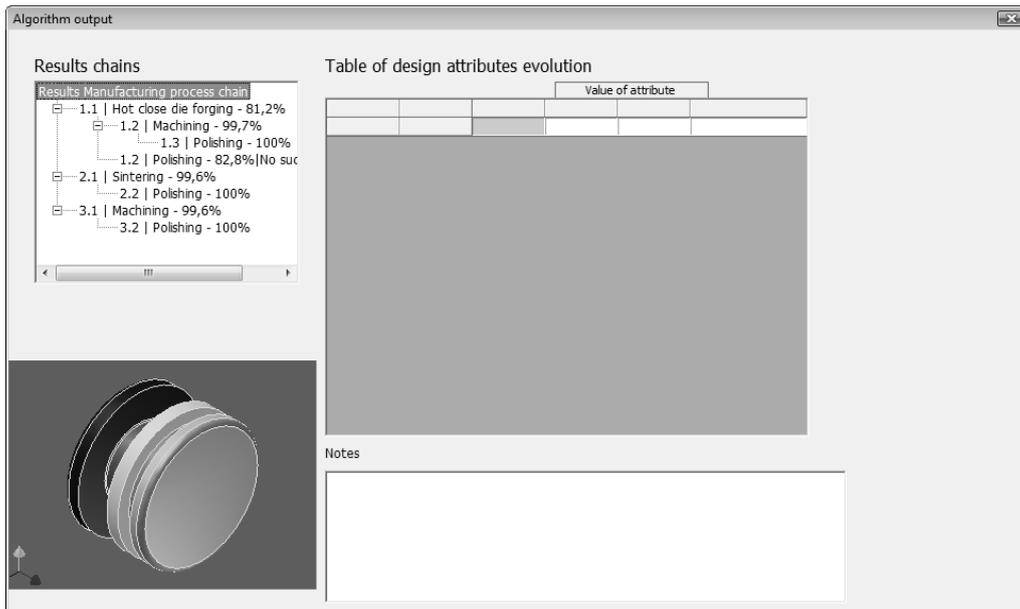


Figura 81 – Formulario “Resultados del algoritmo”, visualización cadenas.

a) Cadena 2: pulvimetalurgia – pulido

En la Tabla 9 recopila los resultados correspondientes con esta cadena de procesos. Estos resultados se componen por los atributos definidos en las zonas ‘descripción dimensional’ ordenados alfabéticamente y los atributos incluidos en ‘información extra’, tales como: “material”, “producción” y “forma básica” quedan ocultos. Aunque el usuario no los vea en primer plano, los atributos que se han ocultado están dentro de la lista de atributos requeridos y el algoritmo garantiza que todos los procesos incluidos en la cadena de procesos de fabricación los complan en su totalidad.

En la columna ‘previo’ de la Tabla 9, para el primer proceso de fabricación (pulvimetalurgia), se observa que todos los valores son cero, lo cual se corresponde con un bruto de partida nulo. La inclusión de este bruto se explica porque hay una serie de procesos de fabricación considerados como los procesos que dan forma que transforman la materia (líquido o en polvo) en preformas o piezas finales (como es el de ‘pulvimetalurgia’). En tales casos la aplicación los relaciona con tener el molde vacío y asume que no existen dimensiones iniciales. Esto no significa que el proceso sea capaz de conseguir cualquier forma y relación dimensional entre volúmenes, ya que para calcular las dimensiones resultante de los volúmenes se consideran las limitaciones del proceso. De forma que en el supuesto caso que alguna de ellas no se pudieran conseguir se ajustarían las dimensiones de los volúmenes salientes de acuerdo con las limitaciones del proceso.

Los resultados de la Tabla 9 muestran que el proceso de ‘pulvimetalurgia’ es capaz de realizar la mayoría de los atributos de diseño, ya que los valores del estado ‘siguiente’, que representan la salida del proceso, coinciden con los valores objetivos

de la columna de ‘*diseño*’; a excepción del “radio de canto interior” correspondiente al ‘*volumen 2*’. Debido a que el proceso no es capaz de alcanzar dicho valor, la aplicación modifica el diámetro que contiene el radio con la finalidad de dejar suficiente material para que el siguiente proceso pueda corregir el “radio del canto” y obtener el valor deseado. Como resultado el proceso de ‘pulido’ deberá rebajar el “diámetro” restante y obtener el “canto de radio” establecido por el diseño.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Pulvimetalurgia	Diameter_1	0	5,5	5,5	5,5
Pulvimetalurgia	Diameter_2	0	3,04	3	2,96
Pulvimetalurgia	Diameter_3	0	5,5	5,5	5,5
Pulvimetalurgia	Diameter_4	0	4,5	4,5	4,5
Pulvimetalurgia	Diameter_5	0	5,5	5,5	5,5
Pulvimetalurgia	DiameterMax	0	5,5	5,5	5,5
Pulvimetalurgia	DiameterMin	0	3	3	3
Pulvimetalurgia	Fillet_ext_1	0	0,2	0,2	0,2
Pulvimetalurgia	Fillet_int_2	0	0,09	0,04	0,13
Pulvimetalurgia	LengthMax	0	3,49	3,49	3,49
Pulido	Diameter_2	3,04	3	3	0,04
Pulido	Fillet_int_2	0,09	0,04	0,04	0,09

Tabla 9 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 2.

La obtención del valor del ‘criterio técnico’ del primer eslabón es el resultado de aplicar la Ecuación 1 sobre los resultados obtenidos en la Tabla 9. En la Ecuación 2 se considera aquellos atributos que no han sido conseguidos en este eslabón: el ‘*Diameter_2*’ y el ‘*Fillet_int_2*’, considerando la distancia entre el valor resultante (columna ‘*siguiente*’ de la Tabla 9) y el valor de diseño (columna ‘*diseño*’ de la Tabla 9), y dividiendo la diferencia por los valores máximos del atributo obtenido entre las diferentes cadenas. Este cálculo se refleja en la Ecuación 2.

$$CT = \frac{1}{10} * \left(\frac{|3,04 - 3|}{6} + \frac{|0,09 - 0,04|}{1,5} \right) = 0,004$$

Ecuación 2 aplicación del criterio técnico de distancia.

No obstante, para facilitar la comprensión del ‘criterio técnico’ se traduce (Ecuación 3) a un porcentaje de afinidad a los atributos de diseño.

$$CT = (1 - 0,004) * 100 = 99,6\%$$

Ecuación 3 conversión a porcentaje.

b) Cadena 3: mecanizado – pulido

La Tabla 10 expone los resultados obtenidos por la aplicación para la cadena de procesos de fabricación 3. Estos resultados se componen por los mismos atributos que en el caso anterior.

En esta cadena el primer proceso es el mecanizado, por consiguiente el bruto inicial de partida se calcula como el volumen contenido en el envolvente mínimo del modelo CAD más 0,5 cm de sobre espesor por cada dimensión de dicho envolvente. De modo que en el caso del émbolo el material de partida se estima en un tocho 6 cm de diámetro y 4 cm de largo, tal y como se observa en la Tabla 10.

Los resultados muestran que el ‘mecanizado’ es capaz de conseguir todos los atributos de diseño menos el valor de “radio del canto interior” perteneciente al ‘volumen 2’ y al igual que en la cadena anterior se realiza una modificación del “diámetro” del ‘volumen 2’. Lo cual significa que el proceso consigue toda la forma básica ajustando el bruto inicial a las diferentes dimensiones de los volúmenes establecidos en el modelo. Para conseguir el valor de diseño requerido por el “radio de canto interior” se requiere como segundo proceso de fabricación, el proceso de ‘pulido’, el cual ocupa el segundo eslabón en la cadena resultante y alcanza los valores de diseño restantes.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Mecanizado	Diameter_1	6	5,5	5,5	0
Mecanizado	Diameter_2	6	3,04	3	2,96
Mecanizado	Diameter_3	6	5,5	5,5	0,5
Mecanizado	Diameter_4	6	4,5	4,5	1,5
Mecanizado	Diameter_5	6	5,5	5,5	0,5
Mecanizado	DiameterMax	6	5,5	5,5	0,5
Mecanizado	DiameterMin	6	3	3	3
Mecanizado	Fillet_ext_1	0	0,2	0,2	0,2
Mecanizado	Fillet_int_2	0	0,08	0,04	0,08
Mecanizado	LengthMax	4	3,49	3,49	0,51
Pulido	Diameter_2	3,04	3	3	0,04
Pulido	Fillet_int_2	0,08	0,04	0,04	0,04

Tabla 10 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 3.

c) Cadena 1: forjado en caliente de matriz cerrada - mecanizado - pulido

La Tabla 11 revela los resultados correspondientes a esta cadena. Tal y como se ha comentado en el apartado 5.1.3, el bruto de partida para el proceso de forja se calcula mediante el volumen que abarca el modelo CAD. Para este cálculo se fija la “longitud máxima” del modelo y con el “peso” se establece el diámetro inicial. Al deformar el bruto se reequilibran los diámetros adoptandolos a los valores finales. El forjado imprimirá un “radio de canto” en la pieza dando así un valor a los atributos ‘Fillet_ext_1’ y ‘Fillet_int_2’. Para los atributos ‘Fillet_ext_1’ y ‘Fillet_int_2’ se modifican con los dos procesos restantes de la cadena debido a las restricciones con lo cual los volúmenes que los albergan se sobre dimensionan.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Forjado	Diameter_1	4,5	5,7	5,5	1,2
Forjado	Diameter_2	4,5	3,04	3	1,46
Forjado	Diameter_3	4,5	5,5	5,5	1
Forjado	Diameter_4	4,5	4,5	4,5	0
Forjado	Diameter_5	4,5	5,5	5,5	1
Forjado	DiameterMax	4,5	5,5	5,5	1
Forjado	DiameterMin	4,5	3	3	1,5
Forjado	Fillet_ext_1	0	1,5	0,2	1,5
Forjado	Fillet_int_2	0	1,5	0,04	1,5
Forjado	LengthMax	3,49	3,49	3,49	0
Mecanizado	Diameter_1	5,7	5,5	5,5	0,2
Mecanizado	Diameter_2	3,04	3,04	3	0
Mecanizado	Fillet_ext_1	1,5	0,2	0,2	1,3
Mecanizado	Fillet_int_2	1,5	0,08	0,04	1,42
Pulido	Diameter_2	3,04	3	3	0,04
Pulido	Fillet_int_2	0,08	0,04	0,04	0,04

Tabla 11 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 1.

La herramienta también devuelve aquellas cadenas que son próximas al diseño propuesto pero que no cumplen al 100% todos los atributos opcionales o características geométricas, como es el caso de la cadena de: forjado en caliente de matriz cerrada – pulido. Con ello se persigue dar flexibilidad a las soluciones aportadas por el algoritmo, permitiendo así considerar nuevos caminos; siempre y cuando se adapten ciertos requerimientos de diseño para alcanzar la viabilidad.

5.2.2 Caso de estudio 2: Pinza de un portabrocas

En el segundo caso de estudio se analiza la carcasa de una pinza portabrocas, que se diseña para ser usada en un centro de mecanizado. Su función principal es conectar la herramienta de corte con el cabezal del centro de mecanizado y transmitir el movimiento del cabezal a la herramienta. Usando el mismo sistema CAD que en el caso anterior se ha desarrollado este primer boceto (Figura 82). Como se puede ver en el plano de la pieza (Figura 82), este ejemplo además de la forma general también incluye diversas características geométricas, tales como: *un agujero*, *un agujero avellanado* y *dos ranuras laterales*.

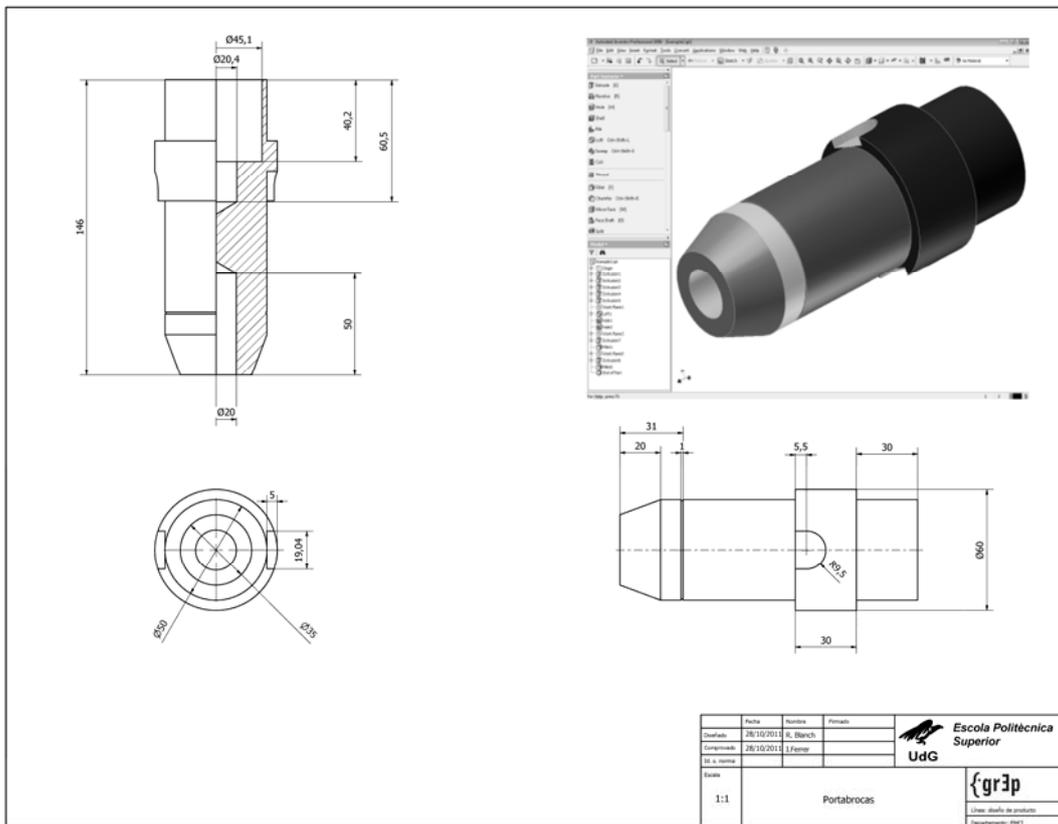


Figura 82 – Modelo CAD de la pinza de un portabrocas, boceto.

- Paso 1. En este caso el modelo que se divide en seis volúmenes diferentes, los cuales se muestran en la Figura 83.

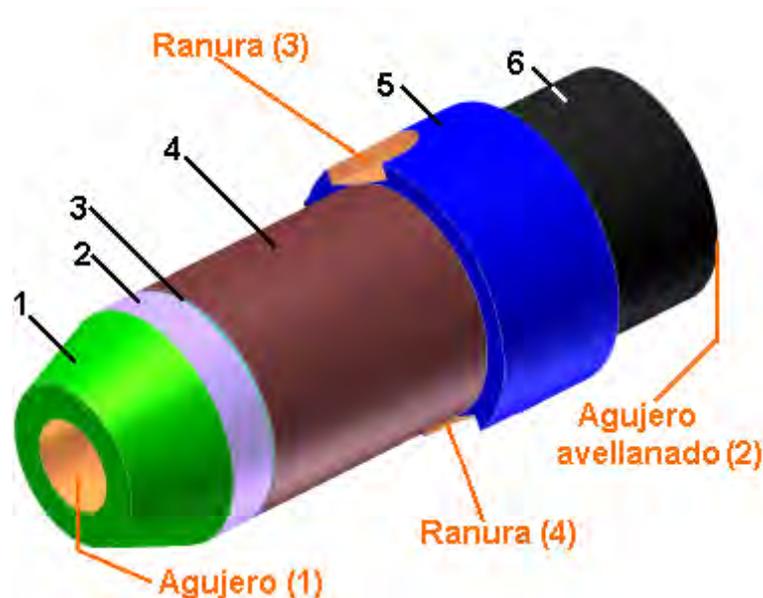


Figura 83 – Modelo CAD dividido en volúmenes.

- Paso 2. La Figura 84 muestra las relaciones entre dichos volúmenes, así como también las características geométricas incluidas en la pinza (marcada en la Figura 83 en color naranja). La relación de las características geométricas con la pinza se almacena en la *tabla feature* en la zona de ‘Descripción de la forma del modelo CAD’ del formulario. Esta tabla almacena la información de la característica geométrica como: el volumen donde empieza, el tipo de característica que es (ej.: agujero, ranura), la ubicación en relación al eje principal del volumen y la posición (ej.: ubicada en la exterior del modelo [en este caso en la superficie] o en el interior del modelo).
- Paso 3 y paso 4. Activando el botón “*clasificar*” se configura la zona de ‘descripción dimensional’ acorde con la descripción del modelo CAD. Para esta pieza, el resultado de la clasificación ha sido pieza del tipo A2, que indica pieza de revolución de un único eje principal y con características geométricas. A diferencia del otro ejemplo, en el formulario “*Introducción de los datos de diseño*” aparecen nuevas pestañas debido a la descripción hecha en la parte ‘descripción de la forma del modelo CAD’. La zona ‘Descripción dimensional’ además de las pestañas vistas en el caso anterior añade las pestañas ‘*Cone Volumes*’ y ‘*Features*’.

La información dimensional se rellena por medio del método de extracción directa implementado en la aplicación. En la Figura 85 se muestra el resultado de extraer los datos correspondientes al *volumen cilíndrico 5* (marcado en color rojo) y al *volumen cónico 1* (marcado en color magenta). Los

valores resultantes de la extracción directa se reescriben en las siguientes tablas.

Process Chain derivation method - Introduce product data

Part Shape Description
Please, introduce the geometrical data from left side to right side

of volumes: 6

#Vol	Type	Axis
1	Cone	X
2	Cylinder	X
3	Cylinder	X
4	Cylinder	X
5	Cylinder	X
6	Cylinder	X

Relationship Code	Contact volume		Contact surface		Axis	
	Left	Right	Left	Right	Location	Relative pc
A	1	2	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
B	2	3	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
C	3	4	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
D	4	5	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned
E	5	6	F.Circular	F.Circular	Parallel	Aligned

#Featur	#Volum	Type	Location	Relative	Situatio
1	1	Hole	Parallel	Aligned	Inside
2	5	Hole	Parallel	Aligned	Inside
3	5	Slot	Parallel	Unalign	Outside
4	5	Slot	Parallel	Unalign	Outside

Main axis? X axis Y axis Z axis Classify

Dimensional Description
A2 - Single/Primary Axis, Regular secondary repetitive features

#Vol	Length	Units	øLeft	Units	øRighth	Units	Fillet	Units	F position
1	2	cm		5 cm		3,5 cm		0	Ignore

Extract Cone data

To edit the values of a dimension, double click on the appropriate cell Extract all Inventor information

Extra data

	Minimal Value	Maximal Value	Units
Production	1	10	Units
General Tolerance	-0,1	0,1	
Weight		1,663	kilogram
Material	Steel		

Extrat Inventor

Save

Figura 84 – Formulario “Introducción de los datos de diseño”, datos introducidos.

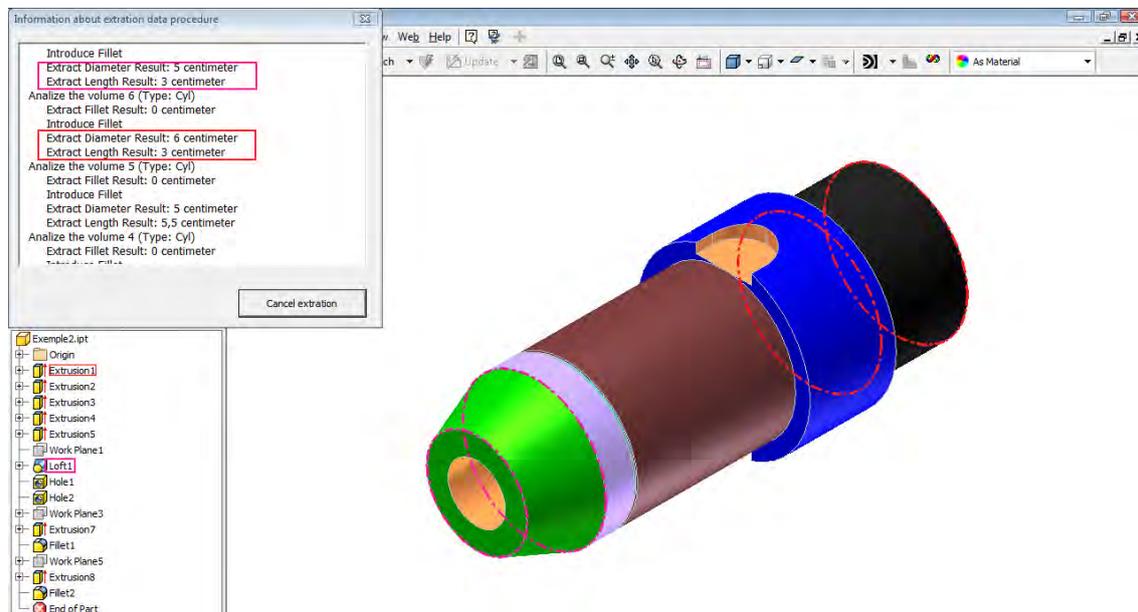


Figura 85 – Método de extracción directa, características seleccionadas.

La Tabla 12 muestra los datos de las dimensiones extraídas para cada volumen. Como se observa en el caso del tronco cónico se explicita dos diámetros (derecho e izquierdo), debido a la definición de este tipo de

volumen. Otro aspecto a remarcar de este caso es que en el momento del análisis no se han definido radios de canto, indicado en la tabla con el valor no definido (N.D.)

Volumen	Color	Tipo	Longitud (cm)	Diámetro (cm)		Radio (cm)
1	Verde	Trono cono	2	Ød=3,5	Øi=5	N.D.
2	Lavanda	Cilíndrico	1	5		N.D.
3	Cían	Cilíndrico	0,1	4,9		N.D.
4	Marón	Cilíndrico	5,5	5		N.D.
5	Azul	Cilíndrico	3	6		N.D.
6	Negro	Cilíndrico	3	5		N.D.

Tabla 12 – Tabla con los datos dimensiones y codificación de color de los diferentes volúmenes (N.D. = No Definido).

La Tabla 13 muestra los datos para los dos agujeros del modelo CAD, en el cual hay un agujero taladrado y uno avellanado. En el primer caso únicamente demanda la altura y el diámetro. Para el caso del agujero avellanado requiere definir ambas dimensiones (diámetro y altura) para el cuerpo del agujero como por la cabeza, siguiendo lo estipulado en el apartado 5.1.1.2.

Car.	Tipo	Subtipo	Acabado	Longitud (cm)		Diámetro (cm)		Radio (cm)
1	Agujero	taladrado	Cónico	5		2		–
				<i>Cuerpo</i>	<i>Cabeza</i>	<i>Cuerpo</i>	<i>Cabeza</i>	
2	Agujero	Avellanado	Cónico	2,03	4,02	2,04	4,51	–

Tabla 13 – Tabla con las características geométricas (agujeros) encontradas en el modelo.

La Tabla 14 muestra los datos para definir las dos ranuras existentes en el modelo CAD, siguiendo lo estipulado en el apartado 5.1.1.2.

Car	Tipo	Subtipo	Acabado	Ancho(cm)	Alto(cm)	Profundidad(cm)
3	Ranura	Rectangular	Abierto-radial	1,9	1,5	0,5
4	Ranura	Rectangular	Abierto-radial	1,9	1,5	0,5

Tabla 14 – Tabla con las características geométricas (ranuras) encontradas en el modelo.

- **Paso 5.** La Tabla 15 muestra la información adicional de la pinza y que no se ha introducida a lo largo de los pasos anteriores.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Producción	1 unidad	10 unidades
Tolerancia general	-0,1	0,1
Peso	1,663 kg	
Material	Acero	

Tabla 15 – Tabla con el resto de atributos de diseño considerados.

- **Paso 6.** Cuando todo el formulario “*Introducción de los datos de diseño*” del caso del portabrocas ya ha sido completado (Figura 84) y el algoritmo ejecutado, se obtienen las posibles cadenas de procesos de fabricación que se muestra en la Figura 86, así como también la historia y la situación en que se encuentra los atributos de diseño.

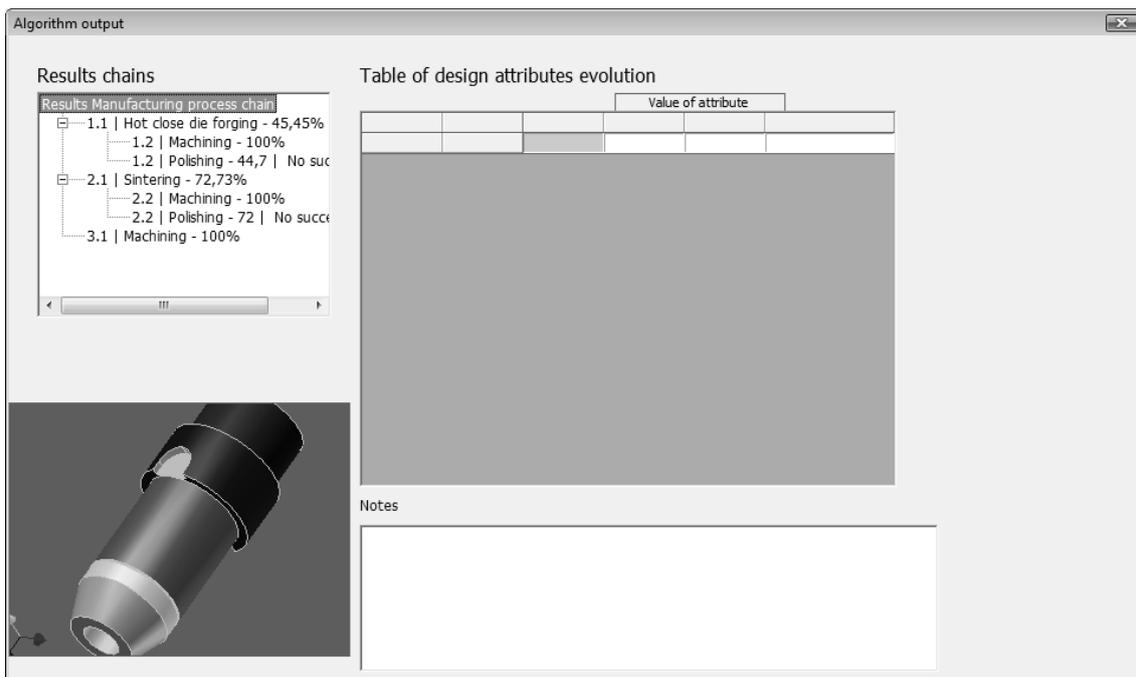


Figura 86 – Formulario “Resultados del algoritmo”, visualización cadenas.

Los resultados están compuesto por tres cadenas de procesos de fabricación: cadena 1: forjado en caliente de matriz cerrada – mecanizado; cadena 2: pulvimetalurgia – mecanizado; cadena 3: mecanizado. Al igual que en el caso anterior, se analiza la evolución de los atributos para cada una de ellas, siguiendo el mismo criterio de orden que en el caso anterior.

a) Cadena 3: mecanizado

En la Tabla 16 se trasladan los resultados obtenidos por la aplicación para la cadena de procesos de fabricación 3, en la cual con un sólo proceso de fabricación se puede realizar toda la pieza. Estos resultados se componen por todo el conjunto de atributos definidos por el usuario por medio de las dimensiones de los volúmenes (cilíndricos y cónicos), características geométricas (dos agujeros y dos ranuras) y los atributos de la zona de 'Información extra'.

Como se observa en la tabla, para mecanizar esta pieza se parte de un bruto de 6,5 cm de diámetro y 15,1 cm de largo, considerando que el sobre espesor asignado al envolvente del modelo es de 0,5 cm. Sobre este envolvente se modelará la forma básica y se le añadirán las características geométricas.

En relación a las 'características geométricas' se asume que se empieza sin ninguna de ellas, con lo cual las dimensiones de las características en un estado inicial son de 0 cm y el proceso de mecanizado añadirá la totalidad de ellas.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Mecanizado	Diameter_1_Left	6,5	5	5	1,5
Mecanizado	Diameter_1_Right	6,5	3,5	3,5	3
Mecanizado	Diameter_2	6,5	5	5	1,5
Mecanizado	Diameter_3	6,5	4,9	4,9	1,6
Mecanizado	Diameter_4	6,5	5	5	1,5
Mecanizado	Diameter_5	6,5	6	6	0,5
Mecanizado	Diameter_6	6,5	5	5	1,5
Mecanizado	DiameterMax	6,5	6	6	0,5
Mecanizado	DiameterMin	6,5	3,5	3,5	3
Mecanizado	Hole_1_Diameter	0	5	5	5
Mecanizado	Hole_1_Length	0	2	2	2
Mecanizado	Hole_2_Diameter	0	2,03	2,03	2,03
Mecanizado	Hole_2_Head_D	0	4,02	4,02	4,02
Mecanizado	Hole_2_Head_L	0	4,51	4,51	4,51
Mecanizado	Hole_2_Length	0	2,04	2,04	2,04
Mecanizado	LengthMax	15,1	14,6	14,6	0,5
Mecanizado	Slot_3_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Mecanizado	Slot_3_Height	0	1,5	1,5	1,5
Mecanizado	Slot_3_Length	0	1,9	1,9	1,9
Mecanizado	Slot_4_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Mecanizado	Slot_4_Height	0	1,5	1,5	1,5
Mecanizado	Slot_4_Length	0	1,9	1,9	1,9

Tabla 16 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 3.

b) Cadena 2: Pulvimetalurgia - mecanizado

Los resultados de esta segunda cadena están detallados en la Tabla 17. En este caso, la cadena está formada por dos procesos de fabricación: ‘pulvimetalurgia’ y ‘mecanizado’. En esta cadena, el primer proceso ‘pulvimetalurgia’ debido a sus restricciones técnicas realiza una forma general de la pieza alterara y los agujeros. Y el proceso de ‘mecanizado’ completa los atributos ‘no resueltos’ por la ‘pulvimetalurgia’, siendo ‘*diameter_3*’ y las ranuras.

Con respecto al atributo ‘*diameter_3*’ al ser de un diámetro inferior que sus adyacentes y con la orientación para hacer los agujeros no es posible realizar este volumen con lo cual la aplicación realiza la misma transformación que su vecino.

Con relación a las ranuras, el proceso de ‘pulvimetalurgia’ no es adecuado para realizarlas y hace que la aplicación incluya un proceso más a la cadena de procesos de fabricación para completar esta carencia.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Pulvimetalurgia	Diameter_1_Left	0	5	5	5
Pulvimetalurgia	Diameter_1_Right	0	3,5	3,5	3,5
Pulvimetalurgia	Diameter_2	0	5	5	5
Pulvimetalurgia	Diameter_3	0	5	4,9	5
Pulvimetalurgia	Diameter_4	0	5	5	5
Pulvimetalurgia	Diameter_5	0	6	6	6
Pulvimetalurgia	Diameter_6	0	5	5	5
Pulvimetalurgia	DiameterMax	0	6	6	6
Pulvimetalurgia	DiameterMin	0	3,5	3,5	3,5
Pulvimetalurgia	LengthMax	0	14,6	14,6	14,6
Pulvimetalurgia	Hole_1_Diameter	0	5	5	5
Pulvimetalurgia	Hole_1_Length	0	2	2	2
Pulvimetalurgia	Hole_2_Diameter	0	2,03	2,03	2,03
Pulvimetalurgia	Hole_2_Head_D	0	4,02	4,02	4,02
Pulvimetalurgia	Hole_2_Head_L	0	4,51	4,51	4,51
Pulvimetalurgia	Hole_2_Length	0	2,04	2,04	2,04
Pulvimetalurgia	Slot_3_Depth	0	0	0,5	0
Pulvimetalurgia	Slot_3_Height	0	0	1,5	0
Pulvimetalurgia	Slot_3_Length	0	0	1,9	0
Pulvimetalurgia	Slot_4_Depth	0	0	0,5	0
Pulvimetalurgia	Slot_4_Height	0	0	1,5	0
Pulvimetalurgia	Slot_4_Length	0	0	1,9	0
Mecanizado	Diameter_3	5	4,9	4,9	0,1
Mecanizado	Slot_3_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Mecanizado	Slot_3_Height	0	1,5	1,5	1,5
Mecanizado	Slot_3_Length	0	1,9	1,9	1,9
Mecanizado	Slot_4_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Mecanizado	Slot_4_Height	0	1,5	1,5	1,5
Mecanizado	Slot_4_Length	0	1,9	1,9	1,9

Tabla 17 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación 2.

c) Cadena 1: forjado en caliente de matriz cerrada - mecanizado

Por último, la cadena 1 está compuesta por los procesos de ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ y ‘mecanizado’. En la Tabla 18 se describen los resultados de los atributos, haciendo que el primer proceso moldea la forma y el segundo proceso contribuye con las características geométricas.

En este caso, el proceso ‘forjado en caliente de matriz cerrada’ realiza la forma del diseño más las ranuras. Obstante los agujeros no serán posibles realizarlos debido a que se encuentre sobre el eje central de la pieza y según la ratio de aspecto la pieza realizara horizontalmente, Al igual que el volumen 3 que debido a su delgadez (de 1 mm) se traslada su acabado a un proceso sucesor, dejándolo al mismo diámetro que sus vecinos.

Procesos	Variable	Previo (cm)	Siguiente (cm)	Diseño (cm)	Transformación (cm)
Forjado	Diameter_1_Left	4,3	5	5	0,7
Forjado	Diameter_1_Right	4,3	3,5	3,5	0,8
Forjado	Diameter_2	4,3	5	5	0,7
Forjado	Diameter_3	4,3	5	4,9	0,7
Forjado	Diameter_4	4,3	5	5	0,7
Forjado	Diameter_5	4,3	6	6	1,7
Forjado	Diameter_6	4,3	5	5	0,7
Forjado	DiameterMax	4,3	6	6	1,7
Forjado	DiameterMin	4,3	3,5	3,5	0,8
Forjado	LengthMax	14,6	14,6	14,6	0
Forjado	Hole_1_Diameter	0	0	5	0
Forjado	Hole_1_Length	0	0	2	0
Forjado	Hole_2_Diameter	0	0	2,03	0
Forjado	Hole_2_Head_D	0	0	4,02	0
Forjado	Hole_2_Head_L	0	0	4,51	0
Forjado	Hole_2_Length	0	0	2,04	0
Forjado	Slot_3_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Forjado	Slot_3_Height	0	1,5	1,5	1,5
Forjado	Slot_3_Length	0	1,9	1,9	1,9
Forjado	Slot_4_Depth	0	0,5	0,5	0,5
Forjado	Slot_4_Height	0	1,5	1,5	1,5
Forjado	Slot_4_Length	0	1,9	1,9	1,9
Mecanizado	Diameter_3	5	4,9	4,9	0,1
Mecanizado	Hole_1_Diameter	0	5	5	5
Mecanizado	Hole_1_Length	0	2	2	2
Mecanizado	Hole_2_Diameter	0	2,03	2,03	2,03
Mecanizado	Hole_2_Head_D	0	4,02	4,02	4,02
Mecanizado	Hole_2_Head_L	0	4,51	4,51	4,51
Mecanizado	Hole_2_Length	0	2,04	2,04	2,04

Tabla 18 – Evolución de los atributos, cadena de procesos de fabricación I.

Como alternativas a estas tres cadenas propuestas por la aplicación, se encuentra dos más, pero no cumplen el 100% de los atributos de diseño introducidos, estas alternativas son: forjado en caliente de matriz cerrada – pulido y pulvimetalurgia – pulido. A analizar por el equipo de diseño la adaptabilidad del diseño para redirigir el diseño ya que son ellos quien conoce las especificaciones y limitaciones impuestas por el cliente.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se resumen a través de las conclusiones el trabajo desarrollado y las metas alcanzadas. Indicando nuevas oportunidades que se derivan de todo el trabajo realizado en esta tesis doctoral.

6.1 Conclusión

Con la realización de esta tesis se ha cumplido con el objetivo propuesto y las sub-metas planteadas. A continuación se expone su justificación.

Se ha realizado una revisión detallada de las estrategias de selección de procesos de fabricación, profundizando detalladamente en la más utilizada; la estrategia de búsqueda libre. Así mismo se ha revisado la parametrización de la información de diseño y la información de fabricación para la selección de procesos de fabricación. También se ha revisado cómo se combinan ambas informaciones, diseño y proceso, y en qué fase de diseño es conveniente empezar a determinar las cadenas de procesos de fabricación que pueden fabricar un determinado diseño. Se ha finalizado haciendo un breve estudio de los fundamentos del reconocimiento de características geométricas de los modelos CAD y analizando la integración de las herramientas de selección de procesos con los sistemas CAD.

La revisión bibliográfica refleja los amplios esfuerzos que se han dedicado a esta área de conocimiento. Sin embargo también se ha detectado una escasez de herramientas que permitan realizar un análisis del diseño de la pieza para obtener cómo se puede fabricar en su totalidad, así como también una fuerte desvinculación entre las herramientas de selección de procesos existentes y los sistemas CAD. Consecuentemente en el transcurso de los capítulos de esta tesis doctoral se ha definido un algoritmo para la confección de cadenas de procesos de fabricación en piezas mecánicas y posteriormente se ha implementado de forma integrada en un sistema CAD.

La construcción del algoritmo se realizó en tres etapas. En la primera etapa se estableció las actividades necesarias para el desarrollo de cadenas de procesos de fabricación, considerando las tareas que actualmente realizan los ingenieros de forma manual. Se ha utilizado la metodología IDEFØ para explicitar dichas actividades, así como también el flujo de información necesario para llevar a cabo cada una de ellas. En la segunda etapa se realizó la codificación de las actividades en un algoritmo programable. Esta transformación se ha logrado por medio del lenguaje UML, el cual ha facilitado organizar la información del IDEFØ en clases, mensajes y formularios. En la tercera etapa se llevó a cabo la implementación del algoritmo diseñado en las dos fases anteriores dentro de una plataforma CAD seleccionada. El algoritmo implementado se ha aplicado a dos piezas prototipos. Dicha aplicación y los resultados obtenidos proporcionan una amplia visión de las posibilidades que ofrece el algoritmo en relación a obtener cadenas de procesos de fabricación, así como también el manejo de las diferentes casuísticas presentadas a lo largo de esta tesis. Como parte de la evaluación se ha analizados con detalle las cadenas obtenidas y su coherencia técnica.

6.2 Contribuciones de la tesis

Los aspectos novedosos de esta tesis, en relación con otros trabajos realizados en la selección de procesos, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La formalización de los pasos a seguir y de la información necesaria para la confección de cadenas de procesos de fabricación durante la fase de materialización del proceso de diseño.
- El desarrollo de cuatros requerimientos básicos para la selección de cadenas de procesos.

- 1) La estructuración de los atributos de selección en requeridos, opcionales y características, haciendo explícito cuáles de ellos se deben obtener de forma indispensable por el primer proceso de la cadena, cuáles por todos los procesos y cuáles se pueden conseguir de forma gradual.
 - 2) La introducción de las reglas tecnológicas de los procesos de fabricación para conseguir cadenas tecnológicamente viables.
 - 3) La utilización del concepto de transformada para la evaluación de las capacidades de los procesos de fabricación, con el cual se puede ajustar mejor el uso de los procesos a las limitaciones físicas y a las limitaciones de fabricación/producción.
 - 4) Y finalmente, el desarrollo de un criterio técnico que informa de la capacidad de cada proceso de la cadena de procesos de fabricación para conseguir los objetivos establecidos por el diseño, permitiendo comparar de forma relativa las distintas alternativas de fabricación propuestas para la pieza.
- La creación de una interface entre el sistema CAD y el propio algoritmo para seleccionar cadenas de procesos.
 - El desarrollo de un procedimiento paramétrico para extraer la información asociada con la geometría, forma y material del modelo CAD, y su correspondiente relación con el algoritmo de selección. De forma que la cadena se puede actualizar en función a los cambios realizados en el modelo de dibujo.

6.3 Trabajos futuros

Considerando los objetivos propuestos, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas, a continuación se comenta las líneas de trabajo futuras que representan una continuación lógica del trabajo hecho.

El algoritmo desarrollado y la herramienta derivada implementada se pueden complementar con los detalles que se exponen a continuación:

- 1) Extender la parametrización de la forma a la totalidad de las formas catalogadas en la clasificación de Swift & Booker, incluyendo las prismáticas y las de chapa de metal.

- 2) Caracterizar nuevos procesos de fabricación para ampliar la base de conocimiento del algoritmo de derivación.
- 3) Mostrar en el modelo CAD los atributos que son modificados por cada proceso que compone la cadena resultante, explicitando así que parte de la pieza es modificada por cada proceso.
- 4) Implementar un algoritmo adicional de ayuda a la clasificación de la forma (ej.: redes neuronales) para establecer la relación entre la descripción analítica de la forma de la pieza, que define el usuario actualmente en la herramienta, y la clasificación de formas de Swift & Booker, que asiste para la selección de cadenas de procesos. Estudiar la conveniencia del uso de algoritmos de reconocimiento de características geométricas, facilitaría la introducción de estos datos en el algoritmo de derivación de cadenas.
- 5) Complementar el criterio técnico propuesto con algún método que proporcione la estimación de costes de fabricación de las cadenas que resultan viables de la aplicación. Esta estimación de coste tendría que tener en consideración los valores de transformación aplicados en cada eslabón así como proponer un ajuste del lote por todos los procesos de fabricación integrados en la cadena.
- 6) Complementar la herramienta con más información de diseñar para fabricar (DFM) y de forma más concreta para el modelo CAD que se está diseñando.
- 7) Explorar más profundamente el campo de investigación del reconocimiento de características geométricas así como el de reconocimientos de forma.
- 8) Explorar la investigación alrededor de los índices de similitud con el que puede aportar combinar la predicción de cadenas con la experiencia de fabricación hecha en diseños similares.

Capítulo 7 Bibliografía

Alting, L. y Zhang, H. (1989). "Computer Aided Process Planning: the state-of-the-art survey". *International Journal of Production Research*, 27 (4), 553-585.

Álvarez Cabrales, A., Pérez Rodríguez, R., Aguilera Rubel, O. y Riba Romeva, C. (2009). "Trazabilidad conceptual cualitativa de los requerimientos funcionales: caso de un molino de vientos". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18 (2), 27-31. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, La Habana, Cuba.

Ashby, M.F., Bréchet, Y.J.M., Cebon, D. y Salvo, L. (2004). "Selection strategies for materials and processes". *Materials and Design*, 25 (1), 51-67.

Aughenbaugh, J.M. y Paredis, C.J.J. (2004). The role and limitations of modeling and simulation in systems design. *American Society of Mechanical Engineers, Computers and Information in Engineering Division, CED*, Anaheim, California, USA, November 13 – 19, 2004, 13-22.

Başak, H. y Gülesin, M. (2004). "A Feature Based Parametric Design Program and Expert System for Design". *Mathematical and Computational Applications*, 9 (3), 359-370.

Blanch, R., Pellicer, N., G-Romeu, M.L. y Ciurana, J. (2008). Designing a decision support tool to aid process planning in machining processes for small and

medium enterprises. *5th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008)*, Nantes, October 22-24, 2008, 273-287.

Blanch, R., Pellicer, N., G.-Romeu, M.L. y Ciurana, J. (2011). "Machining processes time calculating tool integrated in computer aided process planning (CAPP) for small and medium enterprises (SMEs)". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24 (1), 40-52.

Blankenhorn, k. (2004) *A UML Profile for GUI Layout .Tesis de master*. Furtwangen (Germany).

Booch, G., Rumbaugh, J. y Jacobson, I. (2005). *The Unified modeling language user guide*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W.A. (2002). *Product design for manufacture and assembly*. New York etc.: M. Dekker.

Bralla, J.G. (1999). *Design for manufacturability handbook*. Boston: McGraw-Hill.

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.

Capuz Rizo, S. (1999). *Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño de producto*. Valencia (Spain): Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones.

Ciurana, J., Garcia-Romeu, M.L., Ferrer, I. y Casadesús, M. (2008). "A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24 (4), 532-544.

Computer Systems Laboratory (1993). "Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)". *Federal Information Processing Standards Publications*, FIPS183 National Institute of Standards and Technology, Washintong D.C. (USA).

Davis, J.R. y American Society for Metals (1990). *ASM handbook*. Metals Park, Ohio (USA): American Society for Metals.

Denkena, B., Rabinovitch, A. y Henning, H. (2007). Holistic optimisation of manufacturing process chains based on dimensionning technological interface. *4th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2007)*, Bath (UK), September 19-21, 2007, 322-330.

Denkena, B., Rudzio, H. y Brandes, A. (2006). "Methodology for dimensioning technological interfaces of manufacturing process chains". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55 (1), 497-500.

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. (2004). "Computer-based selection of joining processes: Methods, software and case studies". *Materials & Design*, 25 (7), 555-564.

Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (2000). "CES Selector (Cambridge Engineering Selector)". 4.5v.

Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (1998a). "Computer-based selection of manufacturing processes: Methods, software and case studies". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212 (8), 595-610.

Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (1998b). "The development and use of a software tool for selecting manufacturing processes at the early stages of design". *Society for design and process science*, 227-43.

Esawi, A.M.K. y Ashby, M.F. (1998c). The development and use of a software tool for selecting manufacturing processes at the early stages of design. *3rd Biennial World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT 1998)*, Berlin, Germany, July 6-9, 1998, 3, 210-217.

Espinosa Escudero, María del Mar y Domínguez, M. (2007). *Ingeniería concurrente*. Madrid (Spain): Asociación de Ingeniería y Diseño Asistido.

Feng, S.C., Shaw, G.A., Nederbragt, W.W., Kaing, S. y Sriram, R.D. (1999). Incorporating Process Planning into Conceptual Design. *ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC 1999)*, Las Vegas, Nevada (USA), September 12-15, 1999.

Feng, S.C. (2005). "Preliminary design and manufacturing planning integration using web-based intelligent agents". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16 (4-5), 423-437.

Feng, S.C., Stouffer, K.A. y Jurrens, K.K. (2005). "Manufacturing planning and predictive process model integration using software agents". *Advanced Engineering Informatics*, 19 (2), 135-142.

Feng, S.C. y Zhang, Y. (1999). Conceptual process planning - a definition and functional decomposition. *1999 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Nashville, TN (USA), November 14-19, 1999, 10, 97-106.

Fernández García, J., López García, V., Sánchez Lamas, R. y Antuña Nuño, R.M. (2010). "Diseño para fabricación y ensamblaje". 93. Fundación Prodintec. Centro Tecnológico para el Diseño y la Producción Industrial de Asturias., Avilés (Spain).

Ferrer, I., Rios, J. y Ciurana, J. (2009). "An approach to integrate manufacturing process information in part design phases". *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (4), 2085-2091.

Ferrer, I. (2007) *Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación .Tesis doctoral*. Girona (Spain).

Giachetti, R.E. (1998). "A decision support system for material and manufacturing process selection". *Journal of intelligent manufacturing*, 9 (3), 265-276.

Girdhar, A. (2001) *Expansion of Group Technology Part Coding Based on Functionality .Tesis de master*. Cincinnati, Ohio (USA).

Groover, M.P. (1996). *Fundamentals of modern manufacturing materials, process and systems*. New Jersey: Prentice Hall.

Grote, K. y Antonsson, E.K. (2008). *Springer handbook of mechanical engineering*. Berlin: Springer.

Gupta, S.K., Chen, Y., Feng, S. y Sriram, R. (2003). "A system for generating process and material selection advice during embodiment design of mechanical components". *Journal of Manufacturing Systems*, 22 (1), 28-45.

Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D. y Nau, D.S. (1997). "Automated manufacturability analysis: A survey". *Research in Engineering Design*, 9 (3), 168-190.

Gutiérrez Rubert, S.C. (2007) *Análisis y procesado tecnológico del modelo sólido de una pieza para determinar sus elementos característicos de mecanizado .Tesis doctoral*. Valencia (Spain).

Hamilton, K. y Miles, R. (2006). *Learning UML 2.0*. Sebastopol, California: O'Reilly.

Han, J., Pratt, M. y Regli, W.C. (2000). "Manufacturing feature recognition from solid models: A status report". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16 (6), 782-796.

Han, J. (1996) *3D geometric reasoning algorithms for feature recognition .Tesis doctoral*. Los Angeles, California (USA).

Hayasi, M. y Asiabanpour, B. (2009). "Extraction of manufacturing information from design-by-feature solid model through feature recognition". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44 (11), 1191-1203.

Herrmann, J.W., Cooper, J., et al. (2004). New directions in design for manufacturing. *ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and*

Computers and Information in Engineering Conference, Salt Lake City, Utah (USA), September 28-October 2, 2004, 3, 853-861.

Hoffmann, P., Feng, S.C., Ameta, G., Ghodous, P. y Qiao, L. (2008). Towards a Multi-View Semantic Model for Product Feature Description. *15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering (CE2008)*, Belfast, Northern Ireland (UK), August 18-22, 2008, 205-213.

International Organization for Standardization (2005). "Unified Modeling Language Specification". International Organization for Standardization, Genève.

International Organization for Standardization (2000). "Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange – Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features". International Organization for Standardization, Genève.

Ishii, K., Krizan, S., Miller, R.A. y Lee, C. (1991). Hyper Q/Process: An expert system for process selection in design. *6th International Conference on AI Applications in Engineering*, Oxford (UK), July, 1991, 422.

Jiménez López, R. (2003) *Análisis y Diseño Orientado a Objetos de un Framework para el Modelado Estadístico con MLG*. Tesis doctoral. Mallorca (Spain).

Johnson, K.W., Langdon, P.M. y Ashby, M.F. (2002). "Grouping materials and processes for the designer: an application of cluster analysis". *Materials & Design*, 23 (1), 1-10.

Jones, T.J., Reidsema, C. y Smith, A. (2004). Implementation of automated manufacturing process planning in engineering design. *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004*, Gold Coast (Australia), December 12-15, 2004, 17.9.1-17.9.11.

Kalpakjian, S. (2006). *Manufacturing engineering and technology*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.

Kasarda, M.E., Terpenney, J.P., et al. (2007). "Design for adaptability (DFAD) — a new concept for achieving sustainable design". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23 (6), 727-734.

Kryssanov, V.V., Kleshchev, A.S., Fukuda, Y. y Konishi, K. (1998). "Building a logical model in the machining domain for CAPP expert systems". *International Journal of Production Research*, 36 (4), 1075-1089.

Frank Liou. *ME 459 Advanced Topics in Design and Manufacturing*. "http://web.mst.edu/~liou/ME459/cad_cam_intgr/feature_based_dgn.html" (último acceso 10/2010).

Liverani, A. y Ceruti, A. (2010). "Interactive GT code management for mechanical part similarity search and cost prediction". *Computer-Aided Design and Applications*, 7 (1), 1-15.

Lochan, R. (2008). "Introduction to Autodesk Inventor API and Customization for Dummies". *AUGI HotNews*, AUGI India.

Lovatt, A.M. (1998) *Process selection in engineering design .Tesis doctoral*. Cambridge (UK).

Lovatt, A.M. y Shercliff, H.R. (1998a). "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.

Lovatt, A.M. y Shercliff, H.R. (1998b). "Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: The role of process selection". *Materials and Design*, 19 (5-6), 205-215.

Magrab, E.B. (1997). *Integrated product and process design and development : the product realization process*. Boca Raton etc.: CRC Press.

Marchetta, M.G. y Forradellas, R.Q. (2010). "An artificial intelligence planning approach to manufacturing feature recognition". *Computer-Aided Design*, 42 (3), 248-256.

Mauchand, M., Siadat, A., Bernard, A. y Perry, N. (2008). "Proposal for tool-based method of product cost estimation during conceptual design". *Journal of Engineering Design*, 19 (2), 159-172.

Naing, S. (2003) *Feature-based design for jigless assembly .Tesis doctoral*. Cranfield (UK).

NDP-solutions. *Design For Manufacturing Guidelines*. "<http://www.npd-solutions.com/designguidelines.html>" (último acceso 06/2009).

Nederbragt, W., Allen, R., et al. (1998). The NIST Design Process Planning Integration Project. *In Proceedings of Workshop on Advanced Technology and Manufacturing: State-of-the-Art and State of Practice*, Albuquerque, New Mexico (USA), August 31 – September 2, 1998, 135-139.

Noran, O.S. (2000) *Business Modelling: UML vs. IDEF .Tesis de master*. Australia.

Inc Object Management Group. *Unified Modeling Language™ (UML®)*. "<http://www.omg.org/spec/UML/>" (último acceso 01/2011).

Otto, K.N. y Wood, K. (2001). *Product design: techniques in reverse engineering and new product development*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. y Grote, K. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. London: Springer.

Peng, G., Chen, G., Wu, C., Xin, H. y Jiang, Y. (2011). "Applying RBR and CBR to develop a VR based integrated system for machining fixture design". *Expert Systems with Applications*, 38 (1), 26-38.

Petrovic, V. (2008) *Análisis de fabricabilidad de piezas conformadas por moldeo por inyección de polvos*. Tesis doctoral. Valencia (Spain).

Romero, F., Company, P., Agost, M. y Vila, C. (2008). "Activity modelling in a collaborative ceramic tile design chain: An enhanced IDEF0 approach". *Research in Engineering Design*, 19 (1), 1-20.

Senthil kumar, A., Salim, F.K. y Nee, A.Y.C. (1996). "Automatic recognition of design and machining features from prismatic parts". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11 (2), 136-145.

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.

Shih, R. (2007). *Parametric Modeling with Autodesk Inventor 2008*. Mission, Kansas (USA): Schroff Development Corporation.

Skander, A., Roucoules, L. y Klein Meyer, J.S. (2008). "Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37 (5-6), 443-454.

Skander, A. (2006) *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*. Tesis doctoral. Troyes (France).

Smith, C.S., Wright, P.K. y Séquin, C. (2003). "The Manufacturing Advisory Service: Web-based Process and Material Selection". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 16 (6), 373-381.

Spitz, S. y Rappoport, A. (2004). Integrated feature-based and geometric CAD data exchange. *SM '04: Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Genoa, Italy, June 09 - 11, 2004, 183-190.

Swift, K.G. y Booker, J.D. (2003). *Process selection: from design to manufacture*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

SYNTHESIS Coalition. *People, Products and Strategies*. "<http://best.berkeley.edu/~pps/pps/imagemenu.html>" (último acceso 09/2010).

Todd, R.H., Allen, D.K. y Alting, L. (1994). *Manufacturing processes reference guide*. New York: Industrial Press.

Van Kesteren, I., De Bruijn, S. y Stappers, P.J. (2008). "Evaluation of materials selection activities in user-centred design projects". *Journal of Engineering Design*, 19 (5), 417-429.

Verma, A.K. y Rajotia, S. (2010). "A review of machining feature recognition methodologies". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23 (4), 353-368.

Wikipedia. *Unified Modeling Language*. "http://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language" (último acceso 01/2011).

Yu, J.-., Krizan, S. y Ishii, K. (1993). "Computer-aided design for manufacturing process selection". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 4 (3), 199-208.

Zha, X.F. (2005). "A web-based advisory system for process and material selection in concurrent product design for a manufacturing environment". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (3-4), 233-243.

Apéndices

Apéndice A – El modelado IDEF

Durante la década de los 70, las fuerzas aéreas de los EE. UU. desarrolló el programa *Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM)* orientado a aumentar la productividad de fabricación mediante el aprovechamiento de la informática. El programa *ICAM* identificó la necesidad de un mejor análisis y de técnicas de comunicación entre los miembros de los equipos involucrados en la fabricación. Como resultado, el programa *ICAM* desarrolló una serie de técnicas conocidas como *Integration Definition For Function Modeling (IDEF)*.(Computer Systems Laboratory, 1993)

Las técnicas de modelado IDEF permite una descripción gradual del problema que se precisa describir hasta el nivel deseado. Estas técnicas se dividen en la técnica del modelado de actividades, llamada IDEF0, en la técnica del modelado conceptual, llamada IDEF1 y en la técnica del modelado dinámico en la cual influye el tiempo, llamada IDEF2. A este grupo inicial se ha ido incorporando a lo largo de los años otras ramas como son IDEF3 para el modelado de los procesos, IDEF4 para el modelado orientado a objetos, IDEF5 para la captura y modelado de ontologías. Aunque la lista llega hasta el número 14 muchos de ellos no han sido desarrollados (Noran, 2000).

A.1 Modelo IDEF0

En concreto, la técnica IDEF0 está especializada en la creación de modelos funcionales, entendiendo un modelo funcional como una representación estructurada de las funciones, actividades o procesos a realizar dentro del sistema. Puede ser aplicado en cualquier sistema automático o no automático. IDEF0 incluye un lenguaje de modelado gráfico (sintaxis y semántica) y un texto descriptivo (Computer Systems Laboratory, 1993).

A.2 Sintaxis y semántica

La sintaxis de un lenguaje define todos sus componentes y las reglas para definir sus relaciones. Los componentes sintácticos de IDEF0 son: cajas, flechas, reglas y diagramas. Las cajas representan funciones, definidas como actividades, procesos o transformaciones. Las flechas representan los datos u objetos relacionados por las funciones. Las reglas definen como se utilizan cada uno de los componentes, y los diagramas aportan el formato para presentar el modelo verbal y gráficamente (Computer Systems Laboratory, 1993).

El significado de los componentes sintácticos de IDEF0 es: una caja (Figura 87) representa una función, posee un nombre que la describe y un número en su interior utilizado para identificar la caja con el texto asociado. Las flechas simbolizan los pasos de datos u objetos entre las funciones que relacionan.

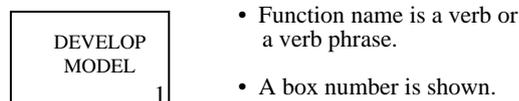


Figura 87 – Sintaxis de la caja, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).

La semántica muestra el significado de cada uno de los componentes sintácticos del lenguaje y ayuda a la correcta interpretación.

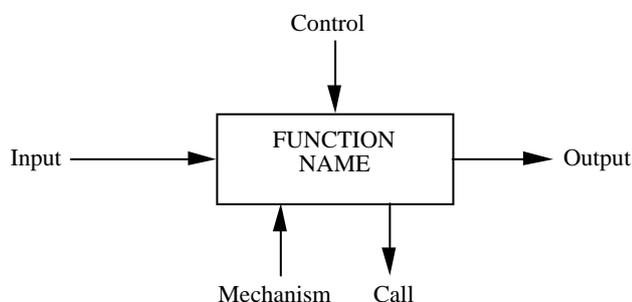


Figura 88 – Posición de las flechas y su función, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).

El tipo de relación entre las cajas, representados por las flechas, tiene un significado diferente según los lados de la caja que conectan las flechas (Figura 88):

- Las flechas que entran por la parte izquierda de la caja representan las entradas. Las entradas son los datos u objetos que son transformados o consumidos por la función para producir las salidas.
- Las flechas que entran por la parte superior son los datos u objetos de control. Éstos especifican las condiciones requeridas para que la función produzca las salidas correctas.
- Las flechas que salen por el lado derecho de la caja representan el resultado de la actividad de la función.
- Las flechas conectadas por la parte inferior de la caja representan los mecanismos. Si entran en la caja identifican los medio utilizados que darán soporte a la ejecución de la función, mientras que si salen de la caja son flechas de llamada. Éstas se utilizan cuando una función está desarrollada con más detalle en otro diagrama y permiten compartir detalles entre modelos y entre partes de un mismo modelo.

A.3 Diagrama IDEFØ

De los diferentes componentes que forma el modelo IDEFØ, el diagrama gráfico es el componente principal de un modelo. En el diagrama gráfico es donde se reflejan las cajas, las flechas y las interconexiones. Las cajas representan cada actividad principal del sistema. Estas actividades se irán descomponiendo en diagramas más detallados hasta llegar al nivel de detalle suficiente para alcanzar los objetivos de un proyecto particular.

El diagrama de más alto nivel posee la información más general o abstracta. Este diagrama es llamado A-0 y donde se define todo el sistema con una única caja con sus flechas colindantes. Las flechas de este diagrama conectan la caja que representa todo el sistema con el exterior. El diagrama A-0 muestra el alcance o propósito del modelo, así como su punto de vista.

Una vez establecido el diagrama A-0 se descompondrá en sub-actividades mediante la creación de un diagrama por cada una de ellas y estas podrán ser descompuestas sucesivamente en otros diagramas. Para mantener la correlación entre diagramas padres e hijos, se indica mediante un código escrito en la esquina inferior derecha de la caja padre que apunta a su diagrama hijo tal y como se refleja en la Figura 89.

Los diagramas pueden tener asociados un texto que permita destacar las características que clarifica el significado de los aspectos que se consideren más relevantes.

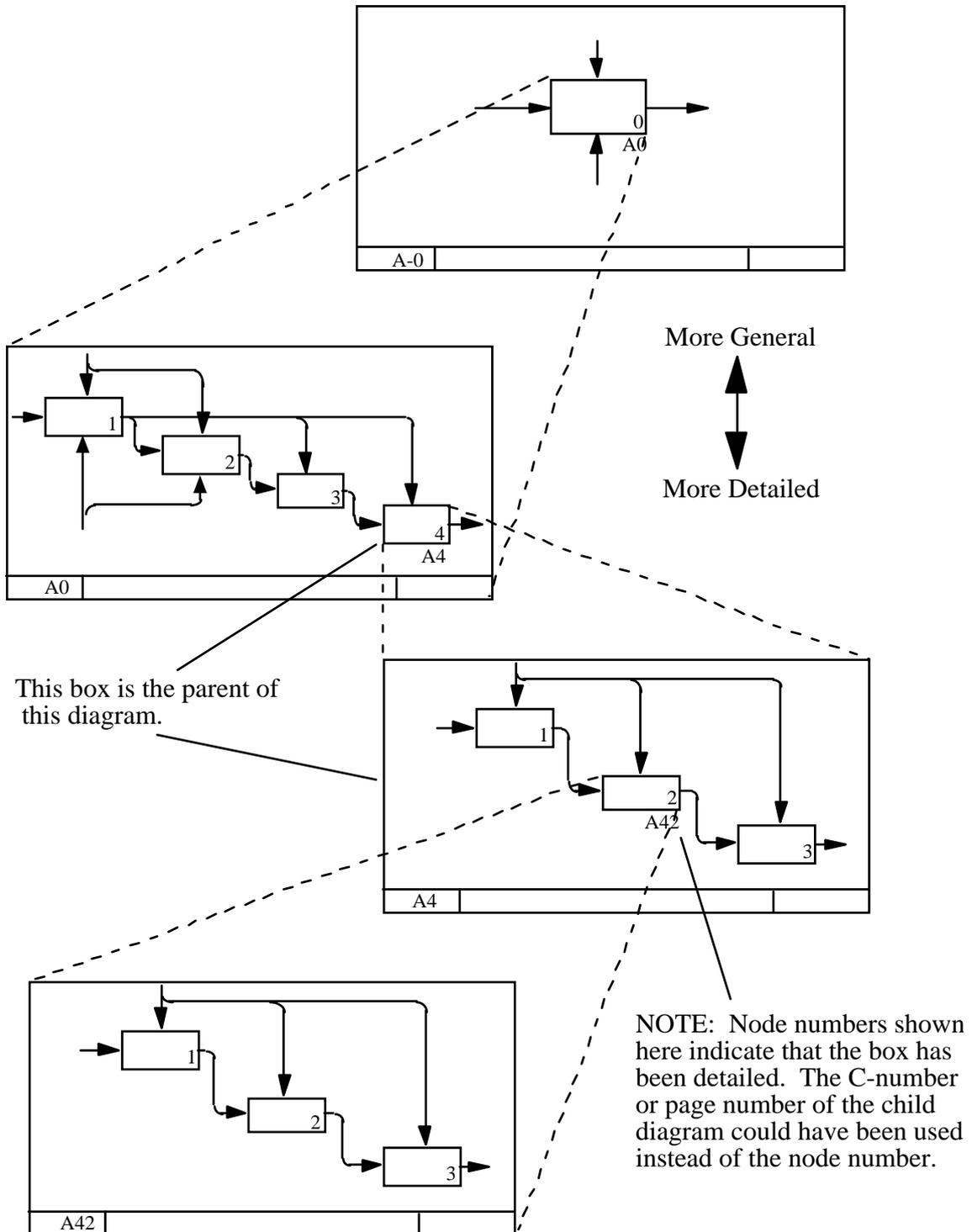


Figura 89 – Estructura jerárquica de los diagramas IDEF0, fuente: (Computer Systems Laboratory, 1993).

Apéndice B – Lenguaje Unificado de Modelado (UML)

Desde su adopción por la Object Management Group (OMG) en noviembre de 1997 hasta la actual versión 2.3 (publicada en mayo de 2010 por (Object Management Group, 3w), el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) se ha convertido en el lenguaje dominante para el modelado de los sistemas de software y convirtiéndose en un estándar ISO, en concreto ISO/IEC 19501(International Organization for Standardization, 2005), el 2005 (Blankenhorn, 2004).

El Lenguaje Unificado de Modelado (UML) es un lenguaje gráfico para la visualización, especificación, construcción y documentación de los elementos importantes de un sistema de software. Además UML ofrece una forma estándar de realizar los planos del sistema incluyendo elementos conceptuales como procesos de negocios y funciones del sistema como también estructuras del lenguaje de programación, esquemas de bases de datos y componentes de software reusables (International Organization for Standardization, 2005). El lenguaje UML incluye tres grandes bloques de construcción: elementos, relaciones y diagramas. Los elementos constituyen los bloques básicos de construcción de este lenguaje de modelado.; las relaciones ligan estos elementos entre sí; los diagramas agrupan colecciones de elementos y son utilizados para visualizar un sistema desde diferentes perspectivas (Jiménez López, 2003).

B.1 Los elementos de UML

En el lenguaje UML se distinguen 4 tipos de elementos: estructurales, comportamiento, agrupación, anotación.

El *grupo de elementos estructurales* representa conceptos tanto abstractos como físicos (usualmente se identifican con *nombres*) que están presentes a lo largo de los modelos (parte estática del modelo). En este grupo se encuentran las clases, interfaces, colaboraciones, casos de uso, clases activas, componentes, artefactos y nodos. Cada uno de ellos con una representación gráfica propia y un comportamiento específico(Hamilton y Miles, 2006; Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

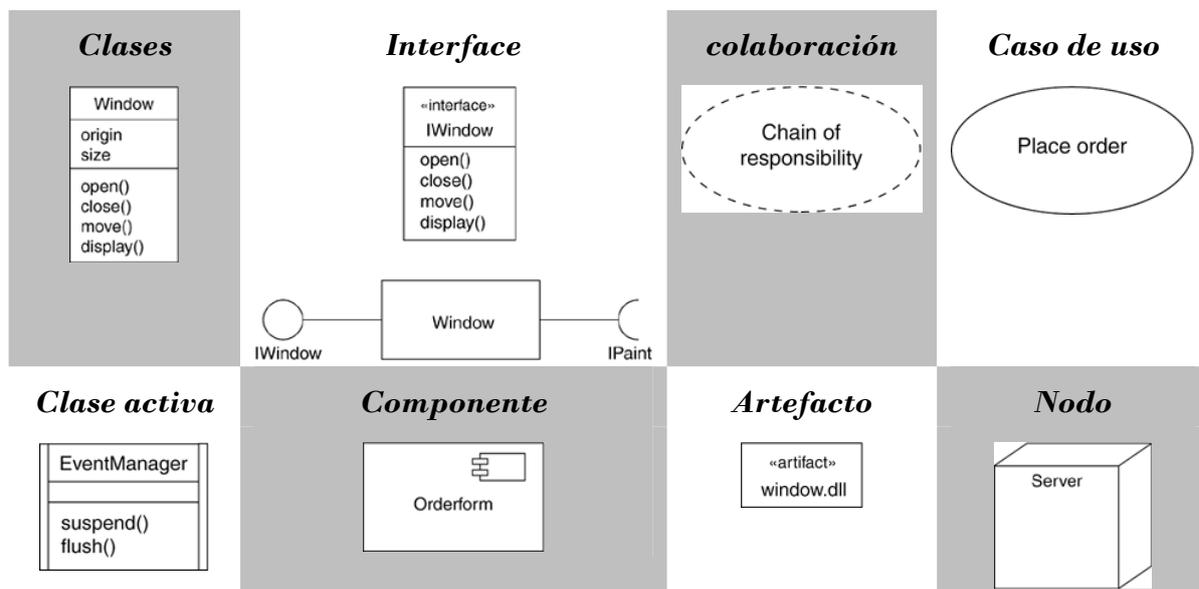


Tabla 19 – representación gráfica de los elementos estáticos, fuente:(Booch et al., 2005).

El **grupo de elementos de comportamiento** representa los conceptos sobre el tiempo y el espacio (usualmente se identifican con *verbos*). En este grupo se encuentran mensajes, estados y acciones (Hamilton y Miles, 2006; Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).



Tabla 20 – representación gráfica de los elementos de comportamiento, fuente: (Booch et al., 2005).

El **grupo de elementos de agrupación** es un grupo con un solo elemento paquetes. Este se utilizan para organizar parte del modelo y el cual se podrá descomponer en sus elementos como ser usado como un elemento más (Hamilton y Miles, 2006; Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

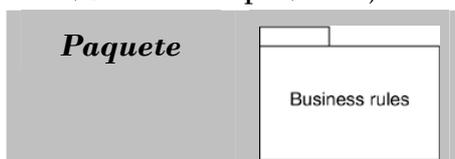


Tabla 21 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).

El **grupo de elementos anotación** también es un grupo de un solo elemento notas. Las notas son utilizadas para describir, ilustrar y remarcar algún aspecto sobre algún elemento del modelo (Hamilton y Miles, 2006; Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).



Tabla 22 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).

B.2 Las relaciones de UML

A través de las relaciones se unirán los diferentes elementos circunscritos en el modelo. El lenguaje UML identifica 4 tipos de relaciones: dependencia, asociación, generalización y realización.

Una **dependencia** es una relación semántica entre dos elementos en el cual un cambio en el elemento independiente puede afectar a la semántica del otro elemento (dependiente) (Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

Una **asociación** es una relación estructural que describe un conjunto de enlaces, los cuales son conexiones entre objetos (Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

Una **generalización** es una relación entre un elemento general (llamado superclase o padres) y un caso más específico de ese elemento (llamado subclase o hijo). (Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

Una **realización** es una relación semántica entre dos elementos estructurales, donde un elemento estructural especifica un contrato con otro elemento estructural que garantiza que cumplirá. Este tipo de relaciones suelen tener lugar en dos situaciones: entre las interfaces y las clases o componente que sean utilizadas y entre los casos de uso y las colaboraciones que sean utilizadas (Booch et al., 2005; Jiménez López, 2003).

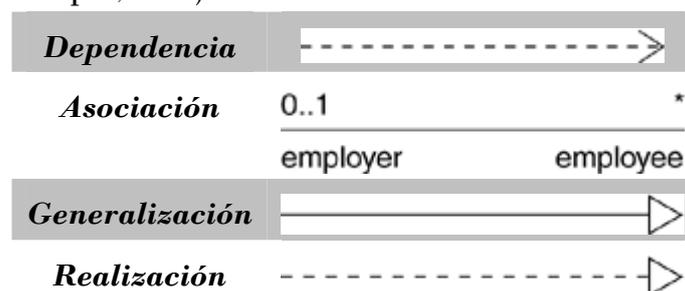


Tabla 23 – representación gráfica de los elementos agrupación, fuente: (Booch et al., 2005).

B.3 Los diagramas de UML

El lenguaje UML reparte sus diferentes diagramas en dos categorías. El conjunto de diagramas estructurales, donde se representan los elementos que deben estar presentes en el sistema que se está modelando. El conjunto de diagramas de

comportamiento, donde se representa lo que debe suceder en el sistema que se está modelando, dentro de este conjunto se encuentran integrado el conjunto de diagramas interactivos, donde se representa el flujo de control y su relación con los elementos. En la Figura 90 se ha explicitado los 14 tipos de diagramas y su división en las dos categorías: estructurales y comportamiento. Y en la Tabla 24 se describen el uso de cada uno de los diagramas expuesto en la Figura 90.

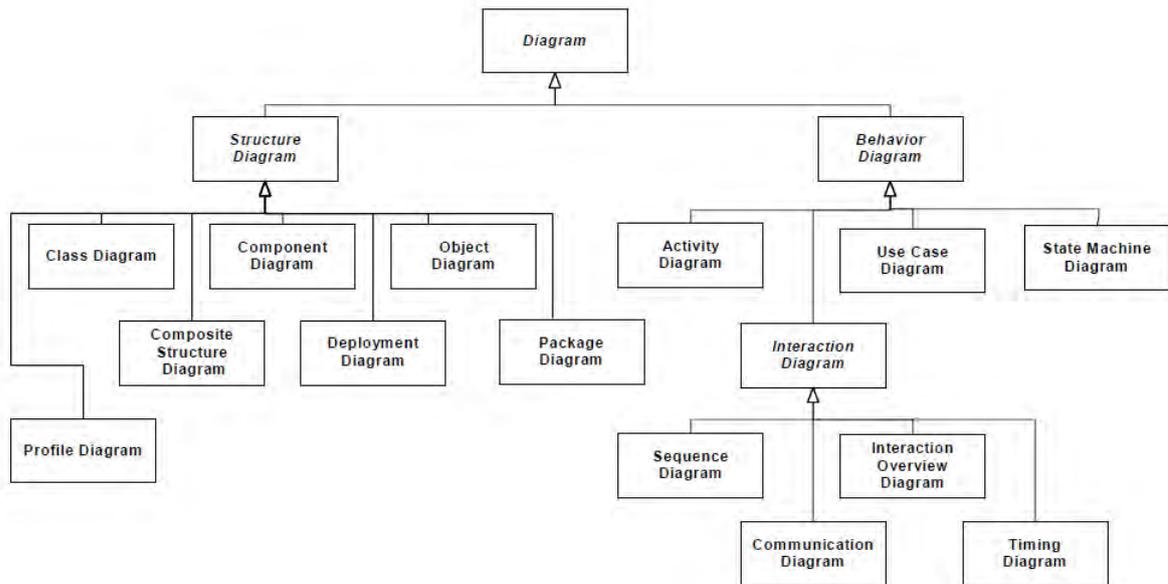


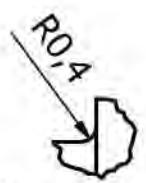
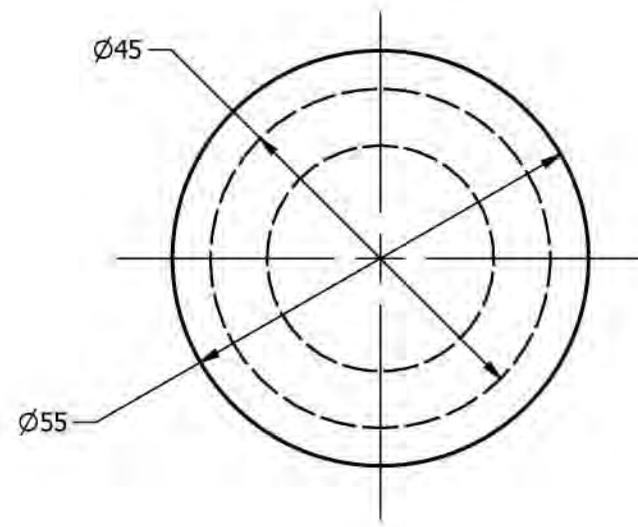
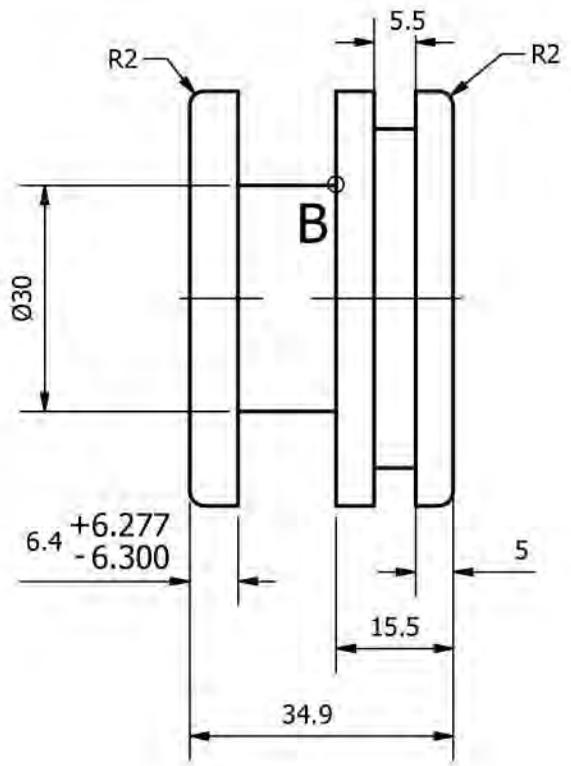
Figura 90 – Taxonomía de diagramas de UML, fuente: (Wikipedia, 3w).

<i>Tipo de diagrama</i>	<i>Descripción</i>
Profile	Opera a nivel metamodelo para mostrar estereotipos
Class	Describe de forma detallada la estructura interna del sistema así como los objetos abstractos
Composite structural	Describe la estructura interna de una clase y las colaboraciones que esta estructura hace posible.
Deployment	Describe el hardware utilizado en las implementaciones del sistema y los componentes que se ejecutan en ellos
Object	Muestra una vista total o parcial de la estructura de un sistema de modelado en un momento determinado
Package	Describe cómo un sistema se divide en agrupaciones lógicas mostrando las dependencias entre esas agrupaciones.
Activity	Se describen los flujos de trabajos empresariales y operativos paso a paso de los componentes en un sistema. Un diagrama de actividades muestra el flujo general de control.
Sequence	La sincronización de mensajes entre objetos durante una interacción
Communication	Muestra las interacciones entre los objetos o partes en términos de mensajes secuenciados.
Interaction overview	Proporciona una visión general en el cual los nodos representan diagramas de comunicación
Timing	Utilizado para explorar el comportamiento de los objetos a lo largo de un período de tiempo determinado.
Use case	Comportamiento del sistema desde el punto de vista de un usuario externo, describir lo que se puede hacer con el sistema
State machine	Varios estados posibles de un objeto y sus transiciones

Tabla 24 – resumen de los diagramas UML, fuente: (Hamilton y Miles, 2006; Blankenhorn, 2004).

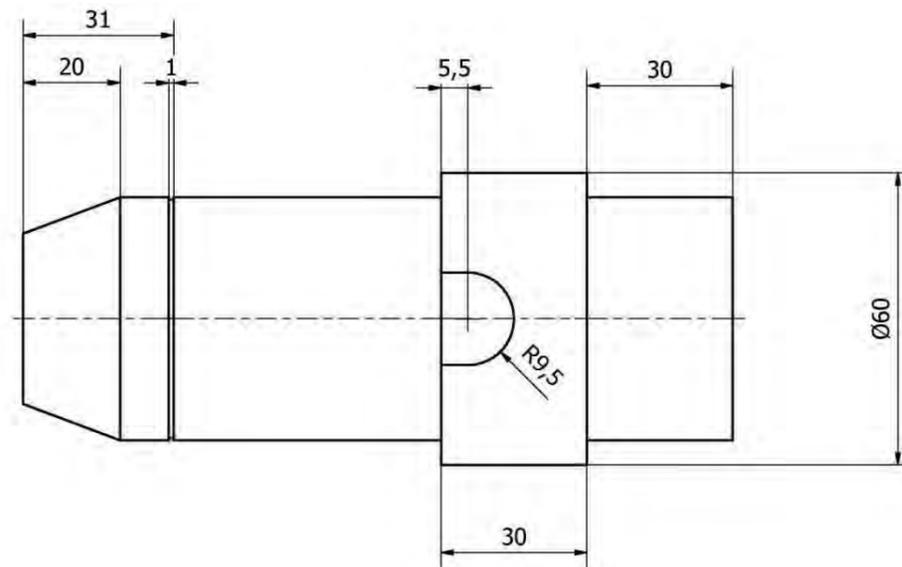
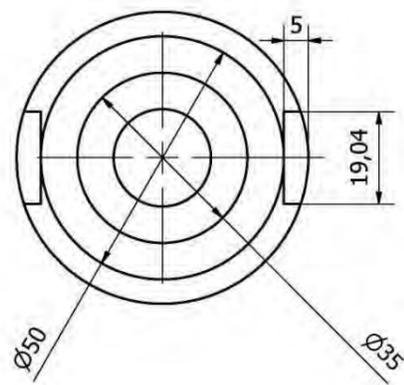
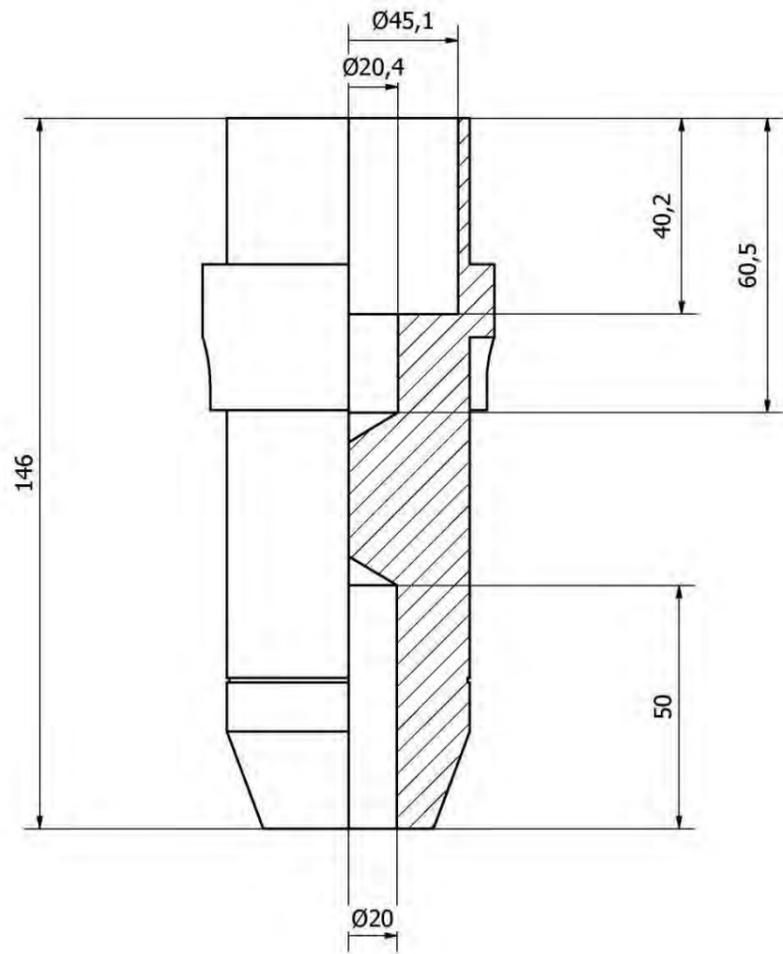
Este conjunto de diagramas son utilizados para modelizar tanto visiones generales del sistema de información como para ser usados en modelizar partes del sistema que reflejan casuísticas particulares. Hasta el punto que el propio lenguaje UML puede ser modelizado utilizando estos diagramas con lo que lleva a desarrollar meta-modelos, definido como un modelo de un modelo.

Apéndice C – Planos de piezas i diagramas



B (5 : 1)

	Fecha	Nombre	Firmado	 Escola Politècnica Superior UdG
Diseñado	28/10/2011	R. Blanch		
Comprovado	28/10/2011	I. Ferrer		
Id. s. norma				
Escala 1:1	Émbolo			 Línea: diseño de producto Departamento: EMCI



	Fecha	Nombre	Firmado	 Escola Politècnica Superior UdG
Diseñado	28/10/2011	R. Blanch		
Comprovado	28/10/2011	I.Ferrer		
Id. s. norma				
Escala	1:1			 gr3p Línea: diseño de producto Departamento: EMCI
Portabrocas				

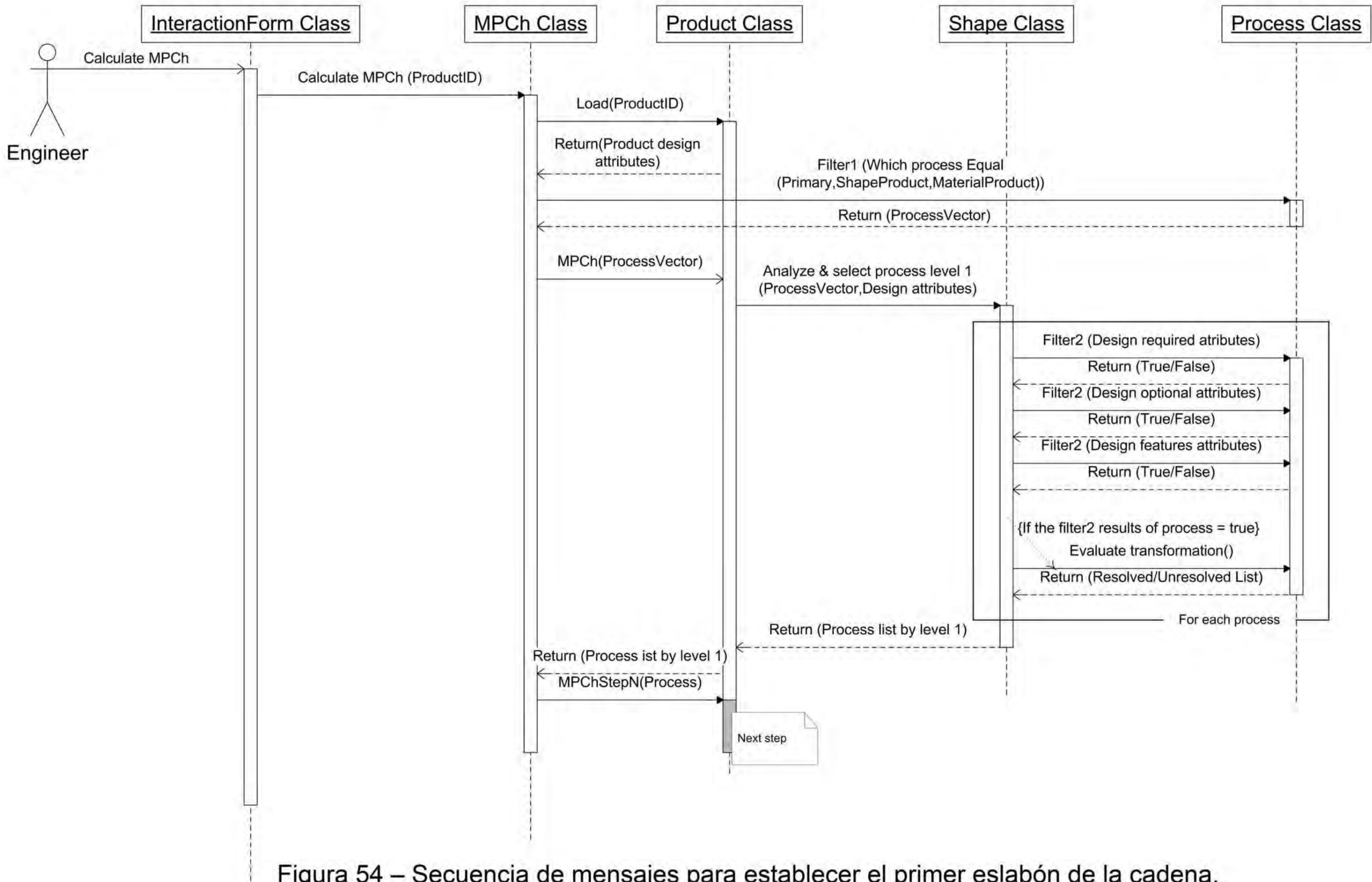


Figura 54 – Secuencia de mensajes para establecer el primer eslabón de la cadena.

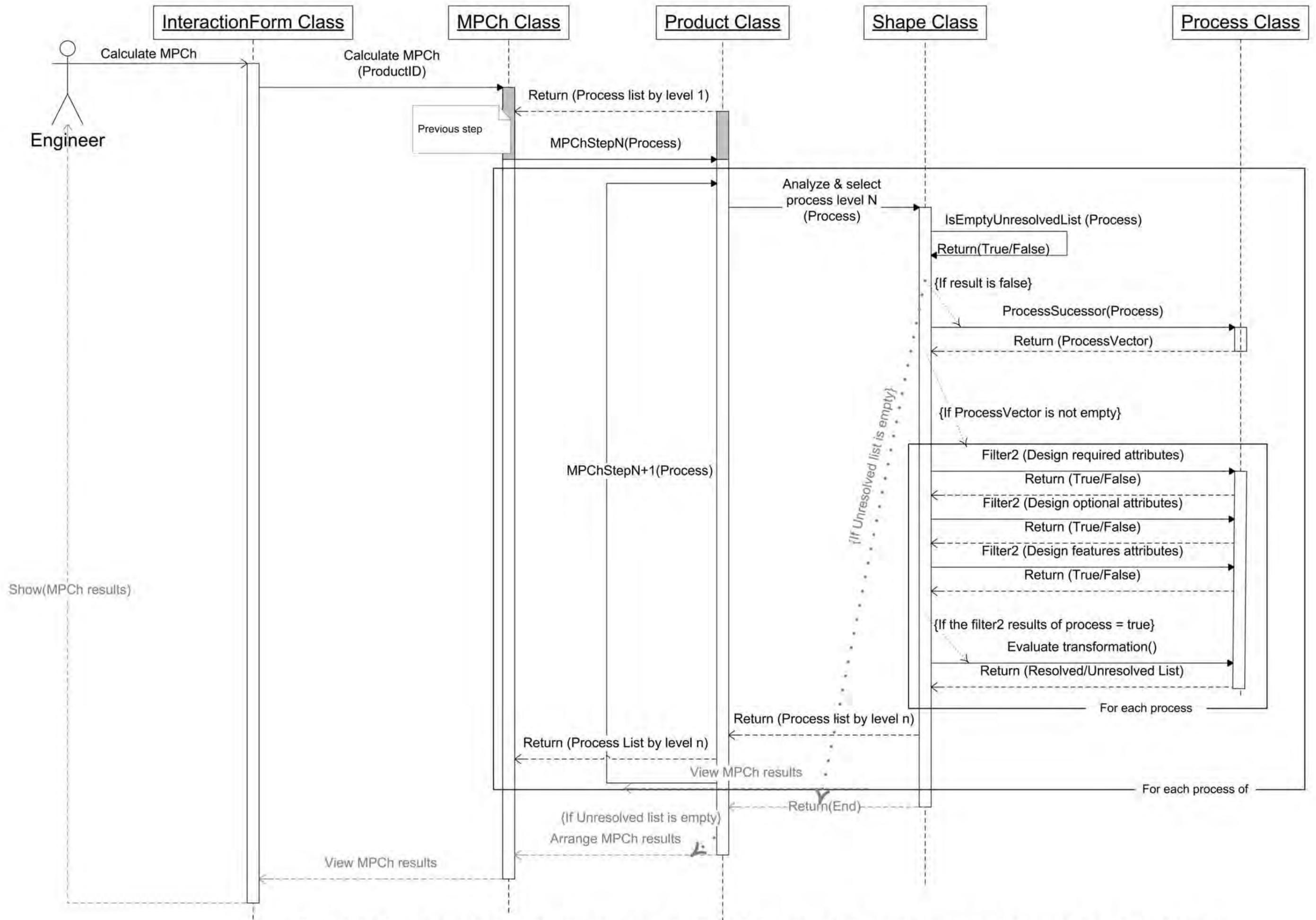


Figura 55 – Secuencia de mensajes para establecer los sucesivos eslabones de la cadena.