

Capítulo 4

Representación de los requerimientos funcionales y las tolerancias en el diseño conceptual

4.1. Introducción

En el ciclo de vida de un determinado producto, las decisiones relacionadas con las tolerancias pueden influir de forma notable en su calidad y costes. Los enfoques existentes en el diseño acerca de la síntesis y/o análisis de tolerancias requieren de una detallada información geométrica y son utilizados generalmente en las etapas avanzadas del proceso de diseño. Durante las etapas de diseño y montaje, la estructura del ensamble y la información relacionada con las tolerancias evoluciona de forma continua. Por lo tanto, una adecuada gestión de ésta información en la etapa conceptual del diseño, permitiría mejorar la toma de decisiones en las etapas primarias del ciclo de vida del producto.

Para posibilitar la toma de decisiones en las etapas más tempranas del proceso de diseño, se necesita de una representación efectiva de la información relacionada con los requerimientos funcionales y las tolerancias, y de una modelación adecuada del ensamble. La intención subyacente del diseñador y las relaciones lógicas existentes entre los requerimientos funcionales pueden perderse si no existe una representación explícita; y por tanto, es necesario el desarrollo de procedimientos que permitan representar a los requerimientos funcionales de una forma explícita y unificada.

En este Capítulo se analiza un método para representar en la etapa del diseño conceptual del proceso de diseño la estructura funcional propuesta en el Capítulo 3. Además, se expone un método para la representación gráfica del ensamble, donde se incluyen aspectos referentes a los requerimientos funcionales y en especial las tolerancias dimensionales y geométricas. Esta representación permite expresar de forma gráfica a los requerimientos funcionales y posibilitará el análisis de las cadenas de tolerancias desde la etapa del diseño conceptual, elemento indispensable para realizar el proceso de síntesis de tolerancias en el diseño básico y de detalle.

4.2. Representación de la estructura funcional en el diseño conceptual

Los requerimientos funcionales que forman parte de la estructura funcional propuesta, y que constituyen las intenciones de diseño, constituyen la principal fuente de información disponible en la etapa conceptual del proceso de diseño. La representación de los requerimientos funcionales es uno de los aspectos claves para el desarrollo de herramientas de diseño conceptual asistidas por ordenador.

Muchos de los trabajos primarios de investigación relacionados con el diseño conceptual permitieron el desarrollo de un conjunto de vocablos estándar relacionados con las funciones mecánicas y demostraron la utilidad de la representación funcional (Has, 1997). Lai y Wilson (Lai, 1989) desarrollaron un lenguaje para la descripción funcional en el diseño mecánico, aplicable a la etapa conceptual del proceso de diseño. El lenguaje permite describir las funciones de los elementos de un conjunto mecánico.

Iyengar *et al.* (Iye, 1994) presentaron un método sistemático para la evaluación objetiva del diseño de diferentes productos que desempeñan la misma función. Los autores utilizan la representación funcional como una herramienta para la evaluación competitiva.

Andersson *et al.* (And, 1995) propusieron un lenguaje para la modelación de los productos mecánicos en las etapas primarias del proceso de diseño, para el caso de los mecanismos y los sistemas de manipulación. El lenguaje aún no está implementado. Por su parte, Hashemian y Gu (Has, 1997) propusieron un modelo para la representación funcional en el diseño conceptual mecánico en términos neutrales. El modelo aún está en una etapa de prueba. En fecha más reciente, Shimomura (Shi, 1998) *et al.* desarrollaron un modelo denominado *FBS* formado por una colección de funciones estándar que son almacenadas en una base de conocimiento. Este modelo es utilizado para la generación y evaluación de diseños conceptuales.

Estas investigaciones suponen dos tipos fundamentales de esquemas o modelos de representación funcional: la modelación del flujo entre entradas y salidas de un producto, y el desarrollo de lenguajes sintácticos que utilizan una gramática basada en verbos y sustantivos para describir un producto. Ambas representaciones tienen un uso limitado en la síntesis de artículos mecánicos (Sud, 2000). La literatura consultada demuestra que la representación de los requerimientos funcionales es esencial para el desarrollo de herramientas de diseño conceptual asistidas por ordenador.

4.2.1. Representación de las categorías *versus* niveles según la estructura funcional

El modelo descriptivo presentado en el Capítulo 3 puede ser utilizado para representar un amplio rango de los requerimientos funcionales relacionados con las tolerancias. Este modelo nos permite comprender la intención de diseño y sus posibles relaciones, posibilitando una comprensión unificada del problema. Además, el disponer de un formato explícito y unificado de los requerimientos funcionales relacionados con las tolerancias, crea las bases para su implantación en un entorno computarizado e integrado con los actuales sistemas *CAD*.

La estructura funcional propuesta —apartado 3.2.6—, puede ser representada de varias formas. Debido a que en la dirección de las categorías y los niveles la estructura funcional es fija, podemos representar los requerimientos funcionales para cada pieza del conjunto mecánico con importancia funcional según muestra la Figura 4.1. Como se puede apreciar, la representación gráfica de los requerimientos funcionales para cada pieza del conjunto con importancia funcional se asemeja desde el punto de vista matemático a una matriz cuadrada de 6x6, donde las filas constituyen las categorías y las columnas los niveles.

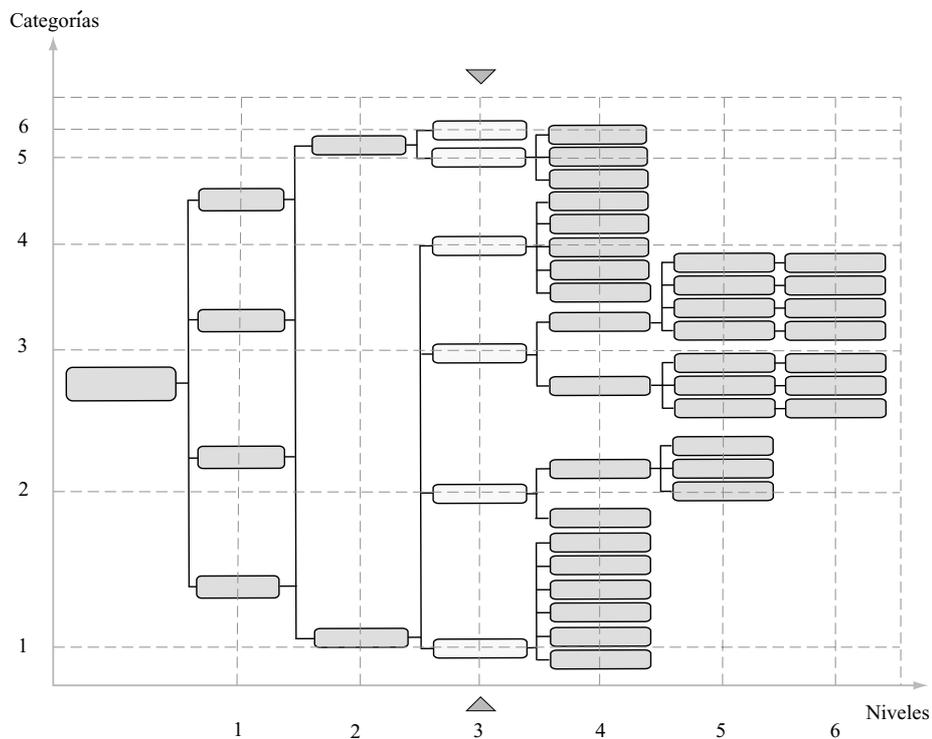


Figura 4.1. Requerimientos funcionales para cada capa de la estructura funcional

Para poder representar la estructura funcional a través de una matriz, es necesario hacer algunas consideraciones para obtener una adecuada representación. Inicialmente se establece un nivel —columna número tres— como base para representar la estructura funcional.

A partir de esta columna se ajusta cada requerimiento a una celda de la matriz, con la particularidad de que sólo la columna número tres coincide plenamente con las celdas de la matriz. A continuación se expone cómo ajustar la estructura funcional a la matriz.

A la matriz de niveles versus categorías que se obtiene se le denomina «matriz funcional simplificada de niveles versus categorías» o «matriz *MSP*» (Figura 4.2). Se le denomina matriz simplificada debido a que sólo se muestra la necesidad de que una determinada capa cumpla con un requisito funcional y caracteriza solamente a los planos correspondientes a las capas en el sistema de coordenadas asociado a la estructura funcional. Esta matriz representa a través de sus elementos $a_{(i,j)}$ cuáles son los requerimientos funcionales que una pieza —capa— debe de cumplir para garantizar el buen desempeño del conjunto mecánico.

Las capas se denotan por la letra C y un subíndice correspondiente al número de la capa — C_i , $i = 1 \dots n$ —, donde n está en función del número de piezas funcionalmente importantes para el desempeño del conjunto mecánico. Los niveles se denotan por la letra N y un subíndice que corresponde al número del nivel — N_i , $i = 1 \dots 6$. De la misma forma, el número de categorías se denota por Ct y un subíndice que indica el número de la categoría — Ct_i , $i = 1 \dots 6$.

En la matriz *MSP* se utiliza una simbología que permite diferenciar cuáles son los requerimientos funcionales que expresan una característica relacionada con las tolerancias —puntos más oscuros— y cuáles son los requerimientos que permiten deducir las características de ingeniería relacionadas con las tolerancias —puntos más claros— (Figuras 4.2 y 4.3). La interpretación de la simbología se realiza siguiendo el sentido expuesto en la estructura funcional. El símbolo «\|» en la matriz *MSP*, indica la cantidad de requerimientos funcionales del mismo tipo que debe de cumplir esa capa en específico.

En el caso de la Figura 4.2, se puede apreciar que el requerimiento identificado por la categoría tres y el nivel seis, constituye una característica de ingeniería relacionada con las tolerancias —punto más oscuro. Si se analiza la estructura funcional de la Figura 4.1, esta característica sería un requerimiento funcional de contacto permanente —dimensión máxima, dimensión mínima o dimensión nominal—, los puntos más claros indican de

forma secuencial, la manera en que este requerimiento se va haciendo más concreto, a medida que se avanza en el eje de los niveles. En la Figura 4.3 se puede observar un caso donde se cumple más de una característica de ingeniería relacionada con las tolerancias, para una categoría y nivel determinado.

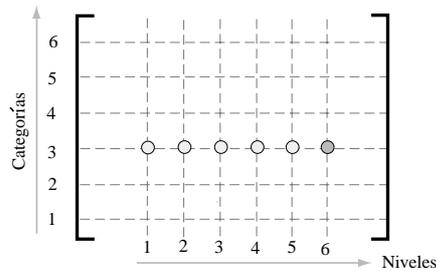


Figura 4.2. Matriz MSP de una capa con un determinado requerimiento funcional

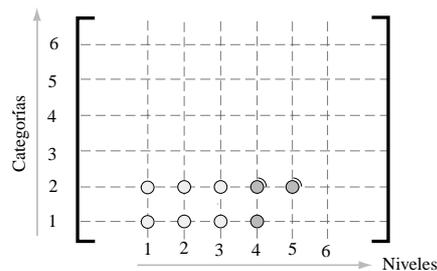


Figura 4.3. Matriz MSP de una capa con varios requerimientos funcionales

Como se observa, la matriz *MSP* permite evaluar de una forma sencilla e intuitiva la importancia funcional de una determinada capa —pieza— en un determinado conjunto mecánico, a través de la simbología expuesta. Esta representación se puede utilizar tanto en casos unidireccionales, como en casos bidireccionales. En los casos bidireccionales, para cada una de las capas se debe de construir una matriz *MSP* por cada dirección de estudio.

Desde el punto de vista de diseño una representación de este tipo no sería idónea, sino existe además de una representación de las necesidades funcionales de cada capa, una representación de las relaciones entre las diferentes piezas respecto a las intenciones del diseñador. Para representar estas relaciones se utiliza una «matriz funcional relacional por capas» o «matriz *RFP*».

La *matriz RLP* (Figura 4.4) permite capturar, además de las intenciones funcionales para cada capa de la estructura funcional, cuáles son las relaciones entre las capas desde este punto de vista, a través de cada elemento $a_{(i,j)}$. La *matriz RLP* estará compuesta de 36 listas de valores, una por cada elemento de la matriz. Cada lista contiene la información relativa a la intención del diseñador. Las listas nulas no poseen ningún significado en la estructura funcional propuesta.

Teniendo en cuenta la estructura funcional propuesta, serán nulas las listas correspondientes a los elementos $L_{(4,6)}$, $L_{(5,1)}$, $L_{(5,4)}$, $L_{(5,5)}$, $L_{(5,6)}$, $L_{(6,1)}$, $L_{(6,2)}$, $L_{(6,4)}$, $L_{(6,5)}$ y $L_{(6,6)}$. La lista $L_{(5,2)}$ podrá ser nula en función del contenido de la lista $L_{(4,2)}$. A continuación se exponen los posibles valores de cada una de las listas de la matriz funcional relacional y sus respectivas restricciones.

Categorías	6	L (6,1)	L (6,2)	L (6,3)	L (6,4)	L (6,5)	L (6,6)
	5	L (5,1)	L (5,2)	L (5,3)	L (5,4)	L (5,5)	L (5,6)
	4	L (4,1)	L (4,2)	L (4,3)	L (4,4)	L (4,5)	L (4,6)
	3	L (3,1)	L (3,2)	L (3,3)	L (3,4)	L (3,5)	L (3,6)
	2	L (2,1)	L (2,2)	L (2,3)	L (2,4)	L (2,5)	L (2,6)
	1	L (1,1)	L (1,2)	L (1,3)	L (1,4)	L (1,5)	L (1,6)
		1	2	3	4	5	6
		Niveles					

Figura 4.4. Matriz RLP para una capa de la estructura funcional

Al igual que en el caso de la matriz *MSP*, la *matriz RLP* se puede utilizar tanto en casos unidireccionales, como en casos bidireccionales. En los casos bidireccionales, para cada una de las capas se debe de construir una *matriz RLP* por cada dirección de estudio.

Restricciones impuestas

A continuación se describe la composición de la *matriz RLP*. Para el primer nivel (Figura 4.4) se cumple que la lista $L_{(i,1)}$ puede tener un valor, falso cuando no se cumple con el requerimiento funcional y verdadero cuando sí se cumple con este requerimiento. Lo anterior se puede expresar a través de la notación (4.1).

$$L_{(i,1)} = \{\text{estado_requerimiento}\}, i = 1 \dots 6 \quad (4.1)$$

donde:

$L_{(i,1)}$: Lista i de la *matriz RLP* para el primer nivel.

estado_requerimiento: Valor del requerimiento funcional, puede ser falso o verdadero, permite capturar la intención del diseñador.

En el segundo nivel, la lista $L_{(i,2)}$ puede tener un valor, falso cuando no se cumple con el requerimiento funcional y verdadero cuando sí se cumple con este requerimiento. Lo anterior se puede expresar a través de (4.2). Para que existan las listas del segundo nivel es una condición necesaria que exista la condición respectiva en el primer nivel (4.3).

$$L_{(i,2)} = \{\text{estado_requerimiento}\}, i = 1 \dots 6 \quad (4.2)$$

$$\text{SI } L_{(i,1)} \text{ ENTONCES } L_{(i,2)}, \quad (4.3)$$

donde:

$L_{(i,2)}$: Lista i de la *matriz RLP* para el segundo nivel.

Para el tercer nivel, se cumple que la lista $L_{(i,3)}$ puede tener un valor, falso cuando no se cumple con el requerimiento funcional y verdadero cuando sí se cumple con este requerimiento. Lo anterior se puede expresar a través de (4.4). Para que existan las listas del tercer nivel es una condición necesaria que exista la condición respectiva en el primer y segundo nivel (4.5). La lista $L_{(6,3)}$ contiene el estado del requerimiento funcional cuantitativo invariable.

$$L_{(i,3)} = \{\text{estado_requerimiento}\}, i = 1 \dots 6 \quad (4.4)$$

$$\text{SI } (L_{(i,1)} \ \&\& \ L_{(i,2)}) \text{ ENTONCES } L_{(i,3)}, \quad (4.5)$$

donde:

$L_{(i,3)}$: Lista i de la *matriz RLP* para el tercer nivel.

$\&\&$: AND lógico.

A partir del cuarto nivel se comienzan a diferenciar los requerimientos funcionales que están más relacionados con las tolerancias, por lo que se abordará cada categoría de la estructura funcional propuesta de forma independiente. Existirán tantas sublistas como condiciones de funcionamiento deba de cumplir el conjunto mecánico. En el caso del requerimiento funcional $a_{(1,4)}$ y a diferencia de los anteriores, la lista $L_{(1,4)}$ estará formada por tres sublistas, una encargada de almacenar la información relativa al estado del requerimiento funcional de ensamble, otra que caracteriza el tipo de subrequerimiento y una sublista que almacena la información relativa a la relación con otras capas, ésta dos últimas tendrán lugar siempre y cuando la primera sea cierta (4.6).

La lista $L_{(1,4)}$ existirá si existen las listas $L_{(1,1)}$, $L_{(1,2)}$ y $L_{(1,3)}$ (4.7). La primera sublista tendrá un valor, falso cuando no se cumple con el requerimiento funcional y verdadero cuando sí se cumpla. Para este requerimiento funcional en particular, existe la restricción de que en caso de que sea verdadero el primer elemento de la segunda sublista, los demás elementos serán falsos. Esto se debe al hecho de que el requerimiento funcional de ensamble base es excluyente respecto a los demás requerimientos en esta lista (4.8).

Los demás requerimientos funcionales en esta sublista no son excluyentes entre sí, por lo que pueden existir indistintamente. La tercera sublista almacena la información relativa al vínculo de este requerimiento con otros requerimientos —*NCP*— presentes en otras piezas del conjunto mecánico.

$$L_{(1,4)} = \{\{\text{estado_requerimiento}\} \{\text{req_enb, req_mtj, req_ajt, req_rfp, req_rfs, req_rfa}\} \{\text{ncp}\}\}, \quad (4.6)$$

$$\text{SI } (L_{(1,1)} \ \&\& \ L_{(1,2)} \ \&\& \ L_{(1,3)}) \ \text{ENTONCES } L_{(1,4)}, \quad (4.7)$$

SI (req_enb es verdadero) ENTONCES

$$L_{(1,4)} = \{\{\text{verdadero}\} \{\text{verdadero, falso, falso, falso, falso, falso}\} \{\text{ncp}\}\} \quad (4.8)$$

donde:

$L_{(1,i)}$: Lista i de la <i>matriz RLP</i> para la primera categoría, $i = 1 \dots 4$.
req_enb	: Estado del requerimiento de ensamble base.
req_mtj	: Estado del requerimiento de montaje.
req_ajt	: Estado del requerimiento de ajuste.
req_rfp	: Estado del requerimiento de referencia primaria.
req_rfs	: Estado del requerimiento de referencia secundaria.
req_rfa	: Estado del requerimiento de referencia abierta.
ncp	: Pieza que cumple con el requerimiento funcional.

La lista $L_{(2,4)}$ perteneciente a la estructura funcional posee una característica peculiar y es que en función del valor que ésta tome, así será el comportamiento de la lista $L_{(2,5)}$. $L_{(2,4)}$ estará formada por dos sublistas, la primera contiene el estado del requerimiento funcional dimensional de contacto permanente —verdadero si se cumple y falso si no se cumple— y el estado del requerimiento funcional de no contacto, la segunda sublista está relacionada con el número de la capa con la cual tiene relación este requerimiento (4.9).

En el caso de que exista la primera sublista, la lista $L_{(2,5)}$ no existirá, pues será un requerimiento funcional de contacto permanente. En caso de que exista la segunda sublista, entonces existiría la lista asociada al elemento $a_{(2,5)}$ de la estructura funcional $L_{(2,5)}$, que almacenaría el tipo de requerimiento funcional dimensional de no contacto. $L_{(2,4)}$ existirá si existen las listas $L_{(2,1)}$, $L_{(2,2)}$ y $L_{(2,3)}$ (4.10) y $L_{(2,5)}$ existe si $L_{(2,4)}$ existe (4.11).

$$L_{(2,4)} = \{\{\text{req_cpr}, \text{req_nct}\} \{\text{ncp}\}\}, \quad (4.9)$$

$$\text{SI } (L_{(2,1)} \ \&\& \ L_{(2,2)} \ \&\& \ L_{(2,3)}) \ \text{ENTONCES } L_{(2,4)}, \quad (4.10)$$

$$\text{SI } L_{(2,4)} \ \text{ENTONCES } L_{(2,5)}, \quad (4.11)$$

donde:

req_cpr: Estado del requerimiento funcional de contacto permanente.

req_nct: Estado del requerimiento funcional de no contacto.

$L_{(2,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la segunda categoría, $i = 1 \dots 5$.

Los requerimientos funcionales geométricos están representados por la lista $L_{(3,4)}$ en la estructura funcional y al igual que en el caso anterior, en función del valor que ésta tome así será el comportamiento de las listas $L_{(3,5)}$, $L_{(3,6)}$. La lista $L_{(3,4)}$ estará formada por dos sublistas, una que contiene el estado del requerimiento funcional geométrico de orientación —verdadero si se cumple y falso si no se cumple— y otra que está relacionada con el estado del requerimiento funcional geométrico de posición —verdadero si se cumple y falso si no se cumple— (4.12).

En caso de que exista la primera sublista y/o la segunda, entonces existirían las listas asociadas a las celdas $a_{(3,5)}$ y $a_{(3,6)}$ de la estructura funcional respectivamente, que almacenarían los tipos de requerimientos funcionales geométricos. La lista $L_{(3,4)}$ existirá si existen las listas $L_{(3,1)}$, $L_{(3,2)}$ y $L_{(3,3)}$ (4.13).

$$L_{(3,4)} = \{\text{req_gto}, \text{req_gts}\}, \quad (4.12)$$

$$\text{SI } (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)}) \ \text{ENTONCES } L_{(3,4)}, \quad (4.13)$$

donde:

$L_{(3,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la tercera categoría, $i = 1 \dots 4$.

req_gto : Estado del requerimiento geométrico de orientación.

req_gts : Estado del requerimiento geométrico de situación.

Los requerimientos funcionales de fabricación están representados a través de la lista $L_{(4,4)}$ en la estructura funcional. Esta lista estará formada por cinco sublistas correspondientes a los diferentes tipos de requerimientos funcionales de fabricación. Cada una de ellas podrá contener un valor, verdadero si se cumple con el requerimiento

funcional y falso si no se cumple (4.14). La lista $L_{(3,4)}$ existirá si existen las correspondientes listas $L_{(4,1)}$, $L_{(4,2)}$ y $L_{(4,3)}$ (4.15).

$$L_{(4,4)} = \{\text{req_eqp}, \text{req_prc}, \text{req_mtr}, \text{req_clc}, \text{req_opr}\}, \quad (4.14)$$

$$\text{SI } (L_{(4,1)} \ \&\& \ L_{(4,2)} \ \&\& \ L_{(4,3)}) \ \text{ENTONCES } L_{(4,4)}, \quad (4.15)$$

donde:

- $L_{(4,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la cuarta categoría, $i = 1 \dots 4$.
- req_eqp : Estado del requerimiento de equipamientos.
- req_prc : Estado del requerimiento de procesos.
- req_mtr : Estado del requerimiento de material.
- req_clc : Estado del requerimiento de colocación.
- req_opr : Estado del requerimiento operacional.

Los requerimientos funcionales cuantitativos de rango se representan en la estructura funcional a través de la lista $L_{(5,4)}$, que estará formada por tres sublistas. Cada sublista contiene el estado de cada tipo de requerimiento funcional cuantitativo de rango, falso en el caso de que no exista o verdadero si el requerimiento existe (4.16). La lista $L_{(5,4)}$ existirá si existen las correspondientes listas $L_{(5,1)}$, $L_{(5,2)}$ y $L_{(5,3)}$ (4.17).

$$L_{(5,4)} = \{\{\text{req_und}, \text{req_una}, \text{req_blt}\} \ \{\{\text{ncp}\} \ \{\text{ncp}\} \ \{\text{ncp}\}\}\}, \quad (4.16)$$

$$\text{SI } (L_{(5,1)} \ \&\& \ L_{(5,2)} \ \&\& \ L_{(5,3)}) \ \text{ENTONCES } L_{(5,4)}, \quad (4.17)$$

donde:

- $L_{(5,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la quinta categoría, $i = 1 \dots 4$.
- req_und : Estado del requerimiento unilateral descendente.
- req_una : Estado del requerimiento unilateral ascendente.
- req_blt : Estado del requerimiento bilateral.

En el quinto nivel sólo existirán las listas asociadas a las celdas $a_{(2,5)}$ y $a_{(3,5)}$. Los requerimientos funcionales dimensionales de no contacto estarán representados por la lista $L_{(2,5)}$ que estará formada por dos sublistas, la primera tendrá tres elementos que pueden ser falsos —cuando no se cumpla el requerimiento— o verdaderos —cuando sí se cumpla con el requerimiento. La segunda sublista indicará la capa con la que guarda relación el requerimiento (4.18). Esta lista existirá sólo en el caso de que existan las listas $L_{(2,1)}$, $L_{(2,2)}$, $L_{(2,3)}$ y la segunda sublista del elemento $a_{(2,4)}$ sea verdadera (4.19).

$$L_{(2,5)} = \{\{\text{req_nom}, \text{req_mín}, \text{req_máx}, \} \{\{\text{ncp}\} \{\text{ncp}\} \{\text{ncp}\}\}\}, \quad (4.18)$$

$$\text{SI } (L_{(2,1)} \&\& L_{(2,2)} \&\& L_{(2,3)} \&\& L^2_{(2,4)}) \text{ ENTONCES } L_{(2,5)}, \quad (4.19)$$

donde:

$L_{(2,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la quinta categoría, $i = 1..5$.

$L^2_{(2,4)}$: Sublista número dos de $L_{(2,4)}$ de la *matriz RLP* para la cuarta categoría.

req_nom : Estado del requerimiento de dimensión nominal.

req_mín : Estado del requerimiento de dimensión mínima.

req_máx : Estado del requerimiento de dimensión máxima.

Los requerimientos funcionales geométricos de orientación y posición están representados en la *matriz RLP*, a través de la lista asociada a la celda $a_{(3,5)}$. $L_{(3,5)}$ está constituida por dos sublistas, la primera de ellas representa a los requerimientos funcionales geométricos de orientación y la segunda representa a los requerimientos funcionales geométricos de posición (4.20).

Cada sublista posee varios elementos encargados de representar el estado de los requerimientos funcionales geométricos de orientación y posición. Los elementos podrán ser falsos, cuando no se cumpla con el requerimiento funcional y verdaderos cuando sí se cumpla. Para que exista la lista $L_{(3,5)}$, es indispensable la existencia de las listas $L_{(3,1)}$, $L_{(3,2)}$, $L_{(3,3)}$ y $L_{(3,4)}$ (4.23).

$$L_{(3,5)} = \{ \{ \text{req_pdm}, \text{req_plm}, \text{req_agm} \} \\ \{ \text{req_psm}, \text{req_smm}, \text{req_cxm}, \text{req_ccm} \} \} \quad (4.20)$$

$$\text{SI} (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L^1_{(3,4)}) \ \text{ENTONCES} \ L^1_{(3,5)}, \quad (4.21)$$

$$\text{SI} (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L^2_{(3,4)}) \ \text{ENTONCES} \ L^2_{(3,5)}, \quad (4.22)$$

$$\text{SI} (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L_{(3,4)}) \ \text{ENTONCES} \ L_{(3,5)}, \quad (4.23)$$

donde:

$L_{(3,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la tercera categoría, $i = 1 \dots 5$.

req_pdm : Estado del requerimiento de perpendicularidad máxima.

req_plm : Estado del requerimiento de paralelismo máximo.

req_ang : Estado del requerimiento de angularidad máxima.

req_psm : Estado del requerimiento de posición máxima.

req_smm : Estado del requerimiento de simetría máxima.

req_cxm : Estado del requerimiento de coaxialidad máxima.

req_ccm : Estado del requerimiento de concentricidad máxima.

$L^1_{(3,4)}$: Sublista $L^1_{(3,4)}$ de la *matriz RLP* para la tercera categoría.

$L^2_{(3,4)}$: Sublista $L^2_{(3,4)}$ de la *matriz RLP* para la tercera categoría.

En el nivel seis sólo existe una lista asociada al tipo de requerimiento funcional geométrico de orientación o posición. La lista $L_{(3,6)}$ contiene el estado final de los requerimientos funcionales geométricos. Su valor podrá ser verdadero cuando se cumpla con este tipo de requerimiento y falso cuando no se cumpla. $L_{(3,6)}$ está constituida por dos sublistas, la primera de ellas representa al estado de los requerimientos funcionales geométricos de orientación con sus respectivos vínculos y la segunda representa al estado de los requerimientos funcionales geométricos de posición y sus vínculos con otras capas (4.24). Para que exista la lista $L_{(3,6)}$, es indispensable la existencia de las listas $L_{(3,1)}$, $L_{(3,2)}$, $L_{(3,3)}$, $L_{(3,4)}$ y $L_{(3,5)}$ (4.25, 4.26 y 4.27).

$$L_{(3,6)} = \{ \{ \{ \text{req_pdm}, \text{req_plm}, \text{req_agm} \} \{ \text{req_psm}, \text{req_smm}, \text{req_cxm}, \text{req_ccm} \} \} \{ \{ \text{ncp}, \text{ncp}, \text{ncp} \} \{ \text{ncp}, \text{ncp}, \text{ncp} \} \} \}, \quad (4.24)$$

$$\text{SI } (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L^1_{(3,4)} \ \&\& \ L^1_{(3,5)}) \\ \text{ENTONCES } L^1_{(3,6)}, \quad (4.25)$$

$$\text{SI } (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L^2_{(3,4)} \ \&\& \ L^2_{(3,5)}) \\ \text{ENTONCES } L^2_{(3,6)}, \quad (4.26)$$

$$\text{SI } (L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L_{(3,4)} \ \&\& \ L_{(3,5)}) \\ \text{ENTONCES } L_{(3,6)}, \quad (4.27)$$

donde:

$L_{(3,i)}$: Lista i de la *matriz RLP* para la tercera categoría, $i = 1 \dots 6$.

$L^1_{(3,5)}$: Primera sublista de $L_{(3,5)}$ de la *matriz RLP* para la tercera categoría.

$L^2_{(3,5)}$: Segunda sublista de $L_{(3,5)}$ de la *matriz RLP* para la tercera categoría.

Cada categoría de la estructura funcional estaría en función del comportamiento de los requerimientos funcionales, por lo que cada una de ellas se puede expresar como una lista condicionada por los requerimientos funcionales (4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33).

$$C_1 = \{L_{(1,1)} \ \&\& \ L_{(1,2)} \ \&\& \ L_{(1,3)} \ \&\& \ L_{(1,4)}\} \quad (4.28)$$

$$C_2 = \{L_{(2,1)} \ \&\& \ L_{(2,2)} \ \&\& \ L_{(2,3)} \ \&\& \ L_{(2,4)} \ \&\& \ L_{(2,5)}\} \quad (4.29)$$

$$C_3 = \{L_{(3,1)} \ \&\& \ L_{(3,2)} \ \&\& \ L_{(3,3)} \ \&\& \ L_{(3,4)} \ \&\& \ L_{(3,5)} \ \&\& \ L_{(3,6)}\} \quad (4.30)$$

$$C_4 = \{L_{(4,1)} \ \&\& \ L_{(4,2)} \ \&\& \ L_{(4,3)} \ \&\& \ L_{(4,4)}\} \quad (4.31)$$

$$C_5 = \{L_{(5,1)} \ \&\& \ L_{(5,2)} \ \&\& \ L_{(5,3)} \ \&\& \ L_{(5,4)}\} \quad (4.32)$$

$$C_6 = \{L_{(6,1)} \ \&\& \ L_{(6,2)} \ \&\& \ L_{(6,3)}\} \quad (4.33)$$

donde:

C_i : Categoría i de la estructura funcional, $i = 1 \dots 6$.

4.2.2. Representación de los niveles *versus* capas según la estructura funcional

Para analizar el comportamiento de los requerimientos funcionales en cada una de las categorías de la estructura funcional propuesta, se utiliza una matriz de niveles — N_i — *versus* capas — C_i — para cada una de las categorías. A diferencia de la matriz expuesta en el caso del apartado anterior, esta matriz tendrá una cantidad fija de columnas —niveles— en función de la categoría y una cantidad variable de capas —filas—, en función del número de piezas que sean funcionalmente importantes en el conjunto mecánico (Figura 4.5). A esta matriz se le denomina «*matriz funcional simplificada por categorías*» o «*matriz MSC*» y cada matriz tendrá una configuración propia.

La «*matriz funcional por categorías*» sólo representa la necesidad de que las piezas cumplan con un determinado requisito funcional y caracteriza a cada categoría — C_i — de la estructura funcional, mostrando cuáles son las piezas en el conjunto mecánico que poseen mayor importancia para el desempeño del producto. Además, permite realizar un estudio para cada una de las categorías de forma independiente, permitiendo al diseñador un análisis centrado en una categoría específica.

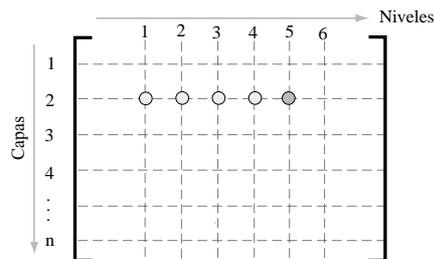


Figura 4.5. Matriz MSC para la categoría C_{t1} de la estructura funcional

De la misma forma que en el caso de la representación de las categorías *versus* niveles, en la representación de los niveles *versus* capas, la simbología utilizada permite diferenciar cuáles son los requerimientos funcionales más concretos —puntos más oscuros— y cuáles son los más abstractos —puntos más claros. En la Figura 4.6 se

muestra un ejemplo de cómo quedaría la matriz *MSC* para el caso de un ensamble compuesto por cuatro piezas, se puede apreciar claramente cuáles son las capas más importantes en las categorías 1 y 2. Además, refleja que el diseñador le ha dado más importancia a la segunda categoría que a la primera.

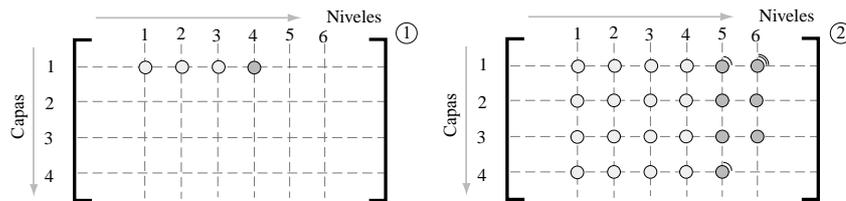


Figura 4.6. Matriz *MSC* para dos categorías de la estructura funcional

De la misma forma se puede obtener la matriz funcional para cada categoría de la estructura funcional. La representación de las relaciones entre las diferentes piezas, vistas para cada categoría se realiza a partir de las matrices *RLP* expuestas en el apartado anterior. La matriz *MSC* se puede utilizar tanto en casos unidireccionales, como en casos bidireccionales. En los casos bidireccionales, para cada una de las capas se debe de construir una matriz *MSC* por cada dirección de estudio.

4.2.3. Representación de las categorías *versus* capas según la estructura funcional

Con la representación de las categorías $-C_{t_i}-$ *versus* capas $-C_i-$ de la estructura funcional, se puede obtener información acerca de la importancia que tiene cada pieza en el funcionamiento del conjunto mecánico en cada uno de los niveles de la estructura funcional. En este caso no se representa cada categoría, sino que se representan a todas las capas $-C_i-$ y a todas las categorías $-C_{t_i}-$ a la vez.

Así, se puede evaluar el grado de complejidad o grado de importancia de las piezas y se puede apreciar para un nivel en específico a cuáles piezas el diseñador le proporcionó más importancia en el conjunto mecánico desde esta perspectiva. A esta matriz se le denomina «matriz funcional simplificada por niveles» o «matriz *MSN*».

La matriz funcional por niveles sólo representa la necesidad de que las piezas cumplan con un determinado requerimiento funcional y caracteriza a cada nivel de la estructura funcional, mostrando cuáles son las piezas en el conjunto mecánico que poseen mayor importancia para el desempeño del producto. En esta representación, sólo interesan aquellos niveles en los que se representen de forma concreta las intenciones del diseñador —niveles 4, 5 y 6—, pues los demás niveles representan a los requerimientos más abstractos y genéricos.

En la Figura 4.7 se muestra un ejemplo de una *matriz MSN* para el quinto nivel de la estructura funcional de un determinado conjunto mecánico formado por cinco piezas. Se puede apreciar claramente cuáles son las piezas más importantes en el quinto nivel de la estructura funcional —piezas 2 y 3. De la misma forma se puede obtener la *matriz MSN* para cada nivel de la estructura funcional.

El símbolo «\» en la matriz *MSN* indica la cantidad de requerimientos funcionales del mismo tipo que debe de cumplir esa capa en específico. La representación de las relaciones entre las diferentes piezas, para cada nivel de la estructura funcional se realiza a partir de las matrices *RLP*.

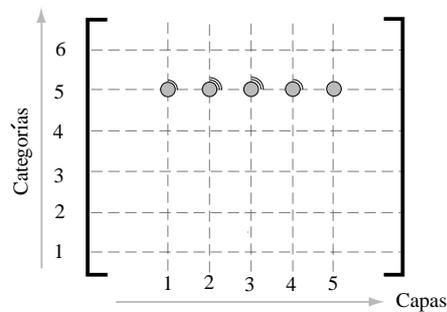


Figura 4.7. Matriz MSN para el quinto nivel en un determinado conjunto mecánico

4.3. Los requerimientos funcionales y la modelación del ensamble en el diseño conceptual

En la actualidad existen dos problemas básicos que influyen de forma notable en la representación de las tolerancias en los sistemas *CAD*. Por una parte, las normas relacionadas con las tolerancias no proporcionan un modelo de tolerancias teórico que sea consistente con los actuales entornos *CAD*, pues están orientadas hacia el dibujo, dando lugar a ambigüedades a la hora de representarlos en estos sistemas. Por otra parte, las normas acerca de las tolerancias no proporcionan un método para la especificación de forma coherente de los requerimientos funcionales.

Los requerimientos funcionales constituyen un elemento fundamental en la obtención de productos a un precio razonable, pues los mismos pueden prevenir las tolerancias redundantes o innecesarias. Las normas actuales acerca de las tolerancias se pueden comparar con un lenguaje con una sintaxis abundante pero con insuficientes métodos y semántica (Sal, 1995). En este apartado se muestra un método que integra a los requerimientos funcionales de forma coherente con los modelos de ensamble en un entorno *CAD*.

En cuanto a la modelación del ensamble en los sistemas *CAD*, varios investigadores lo han intentado describir (Req, 1980, 1984, 1986; Lee, 1985; Roy, 1988^a, 1988^b, 2000; Che, 1994; Clé, 1994; Sal, 1995; Bal, 1995; Söd, 1998^a, 1999^b) con el objetivo de realizar análisis del ensamble, análisis cinemático y análisis de tolerancias.

Según Sudarsan *et al.* (Sud, 2000), los estudios realizados acerca de la modelación de los ensambles en entornos *CAD* pueden clasificarse en: (1) Representación del ensamble, de la geometría de los componentes y la topología; (2) Identificación y establecimiento de las relaciones funcionales entre los componentes de un ensamble; (3) Identificación de las relaciones de precedencia del ensamble; (4) Generación y/o planificación de las secuencias de ensamble; y (5) Análisis del ensamble.

A continuación se exponen los principales enfoques utilizados para modelar los ensambles en los entornos *CAD*, cómo se relacionan las tolerancias con los modelos de ensambles y por último, se propone un método para la representación del ensamble que incluye la estructura funcional propuesta en el Capítulo 3 y se enmarca dentro de las dos primeras tendencias descritas anteriormente.

4.3.1. Principales enfoques en la modelación del ensamble

En la actualidad existe una amplia variedad de modelos que permiten la captura de la información relativa a los ensambles en diferentes niveles en el proceso de diseño. La representación del ensamble se basa en la utilización de modelos basados en modeladores de sólidos, modelos relacionales y modelos jerárquicos (Nar, 1998; Whi, 1996). Los modelos basados en modeladores de sólidos representan la posición de las piezas en términos de sus coordenadas espaciales. Proporcionan suficiente información gráfica del ensamble pero no son adecuados para los propósitos del estudio de las tolerancias. Por ejemplo, los cambios en las posiciones o dimensiones de piezas individuales no se transmiten a las demás piezas en el ensamble.

De acuerdo con Whitney (Whi, 1996), los modelos geométricos utilizados en muchos modeladores de sólidos tienen un conjunto de limitaciones, entre las que se encuentran: sólo pueden representar la estructura del producto en un solo nivel de abstracción por lo que no permiten realizar diferentes tipos de análisis; poseen una capacidad limitada para almacenar la progresión del proceso de diseño y por tanto, no capturan aspectos relacionados con la intención de diseño; a menudo, no pueden capturar la distinción entre aspectos esenciales y aspectos no esenciales; los cambios en la forma, en la geometría y en la posición relativa de la pieza no se transmite totalmente a las demás piezas del modelo; los datos geométricos son sólo uno de los muchos atributos y no están disponibles en las etapas primarias del proceso de diseño.

Por su parte, los modelos relacionales representan las relaciones geométricas en forma de elementos de unión entre las piezas individuales o entre subensambles. Muchas veces se les denomina diagramas de «*liaison*» o modelos de conexión (Whi, 1996). Usualmente los ensambles son modelados como gráficos no dirigidos donde los nodos

representan las piezas y los arcos representan las relaciones geométricas entre ellos. Los arcos pueden tener anotaciones. La posición de las piezas o subensambles pueden representarse a través de una matriz de transformación.

En la Figura 4.9 se muestra una representación relacional del ensamble mostrado en la Figura 4.8. El modelo contiene seis nodos y ocho arcos. Cada arco representa una relación o unión entre las piezas o subensambles. Los modelos relacionales no pueden capturar el orden en el que se establecen las relaciones geométricas. Se utilizan en el análisis de aplicaciones tales como la planificación de la trayectoria de los robots y en la generación de secuencias de ensamble (Sri, 1990). Los modelos relacionales no son adecuados para las tolerancias.

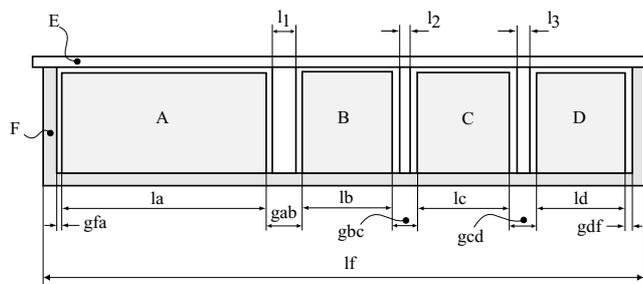


Figura 4.8. Un ensamble mecánico compuesto por dos subensambles (Nar, 1998)

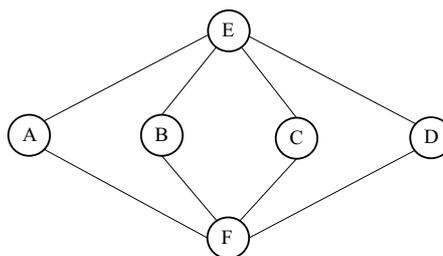


Figura 4.9. Una representación relacional del ensamble de la Figura 4.8

En un modelo jerárquico, el ensamble se representa como una colección de subensambles, los cuales se descomponen en piezas o en niveles de subensambles. Al igual que en el caso de los modelos relacionales, la posición de una determinada pieza o subensamble puede representarse a través de una matriz de transformación. A pesar de

que un modelo jerárquico captura la descomposición del ensamble y las relaciones de precedencia en diferentes niveles, no puede asignar ninguna jerarquía en el orden de establecimiento de los enlaces entre las piezas de un subensamble en particular. Además, semejante jerarquía todavía se encuentra en fase de desarrollo durante las etapas primarias del proceso de diseño.

Una estructura tipo árbol es la más apropiada para representar un modelo jerárquico. Diversos autores han utilizado variantes del modelo jerárquico (Sri, 1990; Lee, 1985; Wan, 1993). La Figura 4.10 muestra una simple representación jerárquica del ensamble representado en la Figura 4.8. El modelo jerárquico se utiliza en el análisis de las secuencias del ensamble, análisis cinemático y en el análisis de tolerancias —durante las etapas avanzadas del diseño.

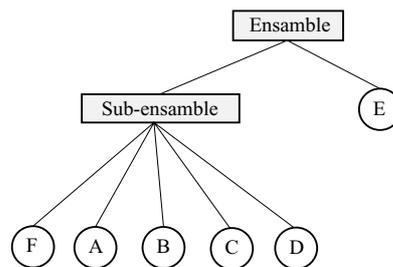


Figura 4.10. Un modelo jerárquico del ensamble de la Figura 4.8

Una de las más recientes propuestas para modelar el ensamble haciendo énfasis en la representación en las etapas primarias del proceso de diseño son las «*cadena de flujos de datos*» —*DFC*— (Whi, 1996; Cun, 1996; Man, 1998; Tho, 1999; Whi, 2001). Un *DFC* es un gráfico acíclico dirigido que define la jerarquía de las relaciones dimensionales entre las piezas de un ensamble. Cada nodo de un *DFC* es una pieza o un dispositivo, o un elemento definido en la pieza o dispositivo.

Un arco dirigido de un Nodo A hacia un Nodo B indica que un elemento de referencia en el Nodo A determina la ubicación dimensional de la pieza B. Las líneas discontinuas, si se utilizan, indican un contacto entre los nodos. La Figura 4.11 muestra una cadena de flujo de datos —*DFC*— para el ensamble mecánico de la Figura 4.8.

Un *DFC* captura de forma abstracta la ubicación lógica de un ensamble y a menudo permite visualizar la forma en que se pueden propagar las tolerancias. Los *DFC* pueden utilizarse en las etapas primarias del diseño para representar las configuraciones evolutivas. Sin embargo, esta representación no garantiza que se capturen todas las intenciones funcionales del diseñador —requerimientos funcionales— de la estructura funcional propuesta en el Capítulo 3.

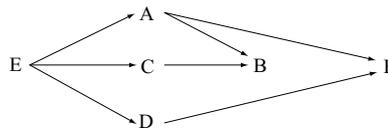


Figura 4.11. Un *DFC* para el ensamble de la Figura 4.8

Las tolerancias y la modelación del ensamble

Los modelos de ensamble expuestos en el apartado anterior son utilizados potencialmente en varias actividades, entre las que se encuentran el análisis de las secuencias del ensamble, el análisis cinemático y el análisis de tolerancias (Sud, 2000). A continuación se exponen algunas consideraciones respecto al vínculo que existe entre la modelación del ensamble y las tolerancias.

Wang y Ozsoy (Wan, 1993) describieron un método para la representación de los ensambles y para la generación automática de las cadenas de tolerancias. Este modelo combina las representaciones relacional y jerárquica. El ensamble se representa a través de una estructura de datos bien elaborada con información acerca de la descomposición del ensamble —elementos de unión, condiciones de unión, matrices de transformación, dimensiones, tolerancias.

Esta información se utiliza para generar a través de algoritmos las cadenas de tolerancias. La representación no necesita de los datos geométricos pero no puede utilizarse en las primeras etapas del proceso de diseño debido a la naturaleza de la información que se requiere para completar la estructura de datos.

Teniendo como objetivo principal el análisis de tolerancias, Whitney, Gilbert y Jastrzebski (Whi, 1994) propusieron un modelo para el ensamble que contiene la siguiente información: elementos de unión de los ensambles, una representación gráfica de los elementos de unión —diagrama de «*liaison*»—, la estructura subyacente y una matriz homogénea de transformación 4x4 para representar las dimensiones y las tolerancias de cada pieza. Las transformaciones representan a las relaciones nominales entre las piezas y las variaciones causadas por las desviaciones geométricas establecidas por las tolerancias. Este tipo de representación puede utilizarse potencialmente en las primeras etapas el proceso de diseño.

Kulkarni y Pande (Kul, 1996) describieron el desarrollo de un sistema para la modelación de las tolerancias en un modelador de sólidos. El objetivo del sistema es el de implementar y facilitar la representación y validación de las tolerancias geométricas y convencionales, así como permitir su utilización en el análisis y la toma de decisiones. El modelo planteado no aborda los requerimientos funcionales ni la síntesis de tolerancias en el ámbito conceptual. Moroni y Requicha (Mor, 1996) desarrollaron un modelador de tolerancias y sus interfaces, asociado a los modeladores de sólidos *CSG* y *B-Rep*. El modelador está en fase experimental y aún posee varios inconvenientes. No se aborda la representación de los requerimientos funcionales.

El concepto *DFC* propuesto por Mantripragada y Whitney (Man, 1998; Whi, 1996, 1999, 2001) puede utilizarse para proporcionar información relativa a la ubicación exacta entre las piezas, relacionar de forma explícita la lógica de las características claves del problema, secuencia de ensamble, la selección de los elementos de unión en el ensamble e información relacionada con el análisis de tolerancias. El modelo propuesto no tiene en consideración la síntesis de tolerancias.

Ngoi *et al.* (Ngo, 1998) desarrollaron un enfoque denominado *cápsula genérica*, orientado fundamentalmente hacia el análisis de la acumulación de tolerancias. El modelo propuesto sólo aborda casos relacionados con el diseño de detalle y no considera los aspectos referentes a los requerimientos funcionales. En los enfoques expuestos anteriormente se puede apreciar la ausencia de una representación del ensamble con un vínculo coherente con los requerimientos funcionales y los elementos indispensables para la síntesis de tolerancias en la etapa de diseño conceptual.

4.3.2. Método de las burbujas para la modelación del ensamble

La especificación de los requerimientos funcionales y la modelación del ensamble constituye en la actualidad un aspecto de interés creciente en la Ingeniería Mecánica asociada a los entornos *CAD*. En la actualidad, las normas y los lenguajes gráficos utilizados para expresar los límites de las variaciones geométricas de las piezas han sido satisfactorias, pero incompletas e imprecisas (Bal, 1993).

Con la utilización sistemática de los ordenadores a todos los niveles del ciclo de vida del producto, especialmente en los niveles de concepción, fabricación y control, la necesidad de integrar las especificaciones y la representación geométrica de las piezas se ha convertido en un hecho imperativo. Para responder a esta necesidad, a continuación se muestra un método denominado «*método de las burbujas*» que integra a los requerimientos funcionales planteados en el Capítulo 3 de forma coherente en un modelo de ensamble para entornos *CAD* (Figura 4.12).

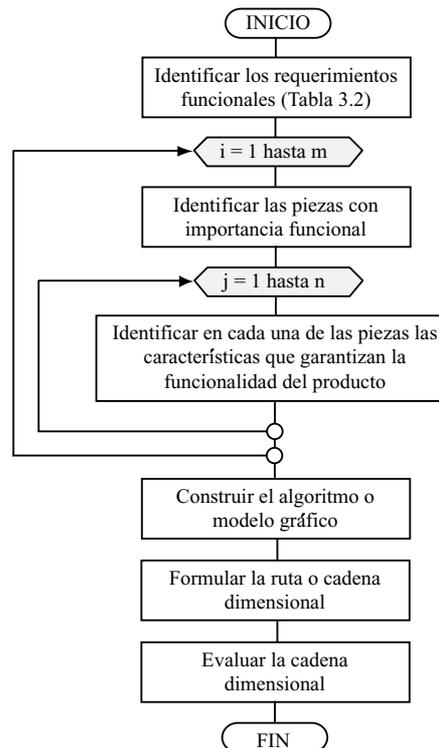


Figura 4.12. Secuencia o algoritmo del método de las burbujas

Este método tiene como objetivo modelar el ensamble de un conjunto mecánico considerando los diferentes requerimientos funcionales propuestos en el Capítulo 3 y orientado a la síntesis de tolerancias. De forma general, el procedimiento a seguir para construir el «*método de las burbujas*» se puede representar a través de un algoritmo (Figura 4.12). En esta Figura, m representa la cantidad de requerimientos funcionales presentes en el ensamble y n muestra la cantidad de características relevantes para cada una de las piezas que garantizan el desempeño del producto.

El procedimiento expresado a través de la Figura 4.12, se puede detallar en forma secuencial, siguiendo los siguientes pasos:

- Paso 1. Identificar los requerimientos funcionales en el ensamble. Estos requerimientos fueron abordados en el Capítulo 3 y se sugiere utilizar la clasificación que muestra la Tabla 3.2.
- Paso 2. Identificar las piezas o elementos funcionales que garantizan el desempeño del conjunto mecánico. En este paso, para cada requerimiento identificado en el Paso 1, se deben de identificar cuáles son las piezas con importancia desde el punto de vista funcional. Se sugiere utilizar una nomenclatura numérica en orden ascendente. En esta etapa de identificación, a cada pieza seleccionada se le asocia un número con el propósito de identificar cuáles piezas del conjunto son representadas en el modelo.
- Paso 3. Identificar en cada una de las piezas con importancia funcional las características que permiten el cumplimiento de los requerimientos funcionales en las piezas. Se sugiere utilizar una nomenclatura en orden alfabético creciente para cada pieza.
- Paso 4. Construir un gráfico que represente las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble.
- Paso 5. Formular la ruta o cadena dimensional que garantice el cumplimiento de cada requerimiento. Una vez que el modelo gráfico ha sido obtenido, la ruta o cadena dimensional puede ser identificada fácilmente.
- Paso 6. Evaluar la cadena dimensional propuesta.

Para identificar los requerimientos funcionales del ensamble mecánico analizados en esta investigación, se sugiere utilizar la estructura funcional de la Figura 3.5 y utilizar la simbología que se muestra en la Figura 3.6 y la Tabla 3.2. Los pasos 2 y 3 se realizan de forma iterativa para cada pieza en cuestión. En la Figura 4.13 se expone un ejemplo de la aplicación de los pasos 1, 2 y 3 del método del método propuesto a un conjunto mecánico formado por cuatro piezas con un requerimiento funcional geométrico.

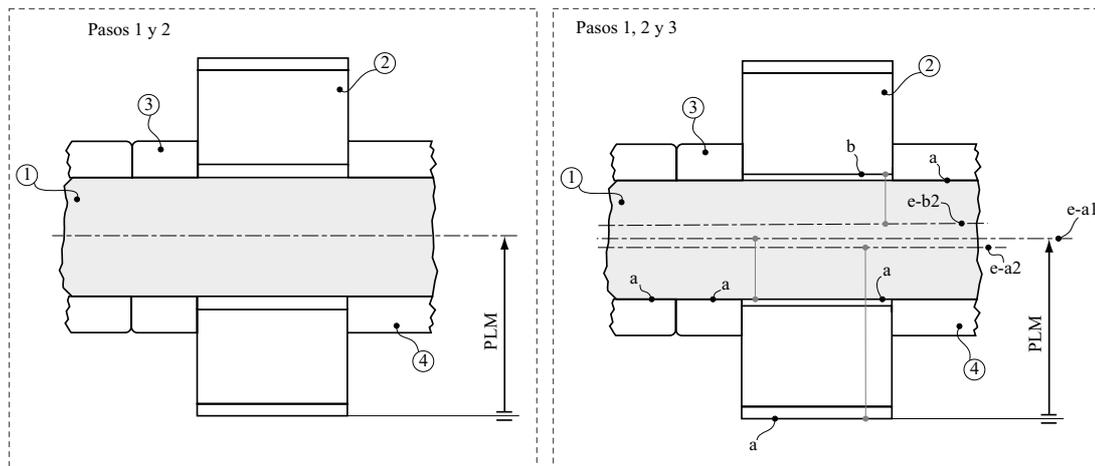


Figura 4.13. Pasos 1, 2 y 3 del método de las burbujas para un determinado ensamble

A continuación se expone la secuencia para la construcción del gráfico que representa las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble —paso 3 del método de las burbujas. Este gráfico servirá como base para la formulación de las cadenas dimensionales.

Construcción del gráfico que representa las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble mecánico

El elemento básico del gráfico que representa las interacciones y los requerimientos funcionales del ensamble, lo constituye el nodo o burbuja. Un nodo o burbuja es un círculo que contiene la información necesaria para obtener las cadenas de cotas en la etapa del diseño conceptual. Cada burbuja representa una pieza y en su interior se representan cuáles características de la pieza son relevantes desde el punto de vista funcional, así como sus relaciones.

A partir de la identificación de los requerimientos funcionales y de las piezas que garantizan un adecuado desempeño del conjunto mecánico, los nodos se construyen con facilidad. Debido a la naturaleza de los requerimientos funcionales —Figura 3.5—, el método distingue dos tipos de gráficos, el gráfico que representa a los requerimientos funcionales dimensionales —incluye a los requerimientos funcionales de paralelismo máximo en los casos de conjuntos mecánicos con piezas prismáticas— y el gráfico que representa a los requerimientos funcionales geométricos.

A continuación se describe el primero de los gráficos o gráficos para los casos de requerimientos funcionales dimensionales, que incluye a los requerimientos funcionales de paralelismo máximo en los casos de conjuntos mecánico con piezas prismáticas.

En la Figura 4.14 se muestra la configuración básica de cada nodo —un nodo por cada pieza del conjunto mecánico que se analice— para la familia de las tolerancias dimensionales. La burbuja resulta muy útil para la construcción del gráfico, el cual será utilizado para obtener en la etapa del diseño conceptual, las cadenas dimensionales.

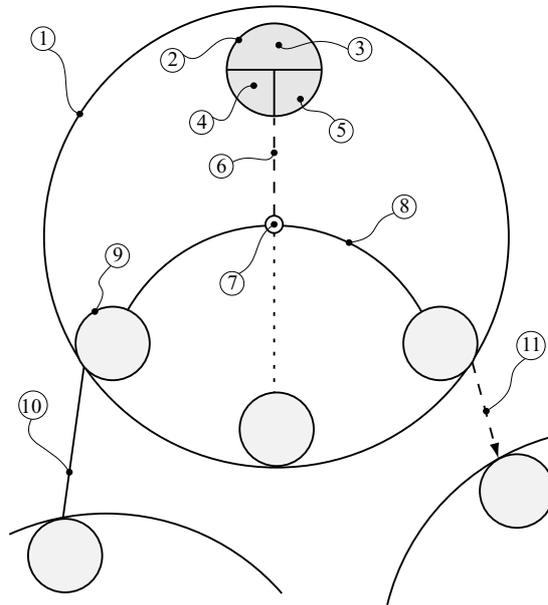


Figura 4.14. Método de la burbuja para los requerimientos funcionales dimensionales

Una de las principales ventajas de la utilización de modelos gráficos genéricos, como es el caso del método de la burbuja, es que permiten reducir considerablemente el tiempo empleado en la elaboración de las rutas o cadenas dimensionales. A continuación se describe la anatomía o estructura del método de la burbuja para los casos de los requerimientos funcionales dimensionales representado en la Figura 4.14.

- (1) Nodo principal de la capa. Para cada capa del ensamble existirá un nodo principal, que contiene en su interior toda la información relacionada con los requerimientos funcionales y sus relaciones con las demás piezas.
- (2) Nodo de identificación de la capa o pieza de la estructura funcional. Es un nodo en forma circular que representa a una determinada pieza del conjunto mecánico que se analiza.
- (3) Identificador de la pieza. Representa un identificador por cada pieza del conjunto mecánico.
- (4) Contador de condiciones funcionales. Este indicador controla el número de condiciones funcionales en las que participa este nodo, indicando la importancia funcional dentro del conjunto mecánico.
- (5) Identificador de las condiciones de ensamble. Este identificador permite conocer cuáles son las condiciones funcionales que debe de cumplir este nodo respecto al ensamble.
- (6) Vínculo nodal. Permite la unión entre el nodo de identificación de la capa y el nodo de relación. Se representa a través de una línea recta discontinua.
- (7) Nodo de relación. Este nodo permite vincular las características funcionales geométricas de la pieza. Todas las características importantes de una determinada pieza deben de estar vinculadas a este nodo a través de un vínculo geométrico.
- (8) Vínculo geométrico. Este vínculo permite expresar las relaciones geométricas entre las diferentes características de la pieza. Se representa a través de un arco continuo entre el nodo de relación y el nodo de la característica en cuestión.
- (9) Nodo de la característica i — $i = 1 \dots n$. Este nodo identifica a una determinada característica de la pieza que se analiza. Cada característica importante de la pieza, desde el punto de vista funcional, debe de ser representada a través de un

nodo de característica. Se sugiere utilizar una nomenclatura en orden alfabético ascendente para cada nodo de la característica.

- (10) Vínculo de ensamble. Permite expresar la unión o relación que existe entre las características pertenecientes a diferentes piezas o nodos de identificación de las capas. Se representa a través de una línea recta continua entre nodos de características pertenecientes a diferentes piezas.
- (11) Vínculo funcional. Permite representar las diferentes condiciones funcionales que debe de cumplir el conjunto mecánico para un desempeño adecuado. El vínculo se indica a través de un vector en líneas discontinuas y con una etiqueta que representa al requerimiento según la estructura funcional propuesta (Tabla 3.2). El sentido del vector indica el orden o secuencia a seguir para la elaboración de la ruta o cadena dimensional.

La construcción del método gráfico para los requerimientos funcionales dimensionales se puede representar a través de un algoritmo, como muestra la Figura 4.15.

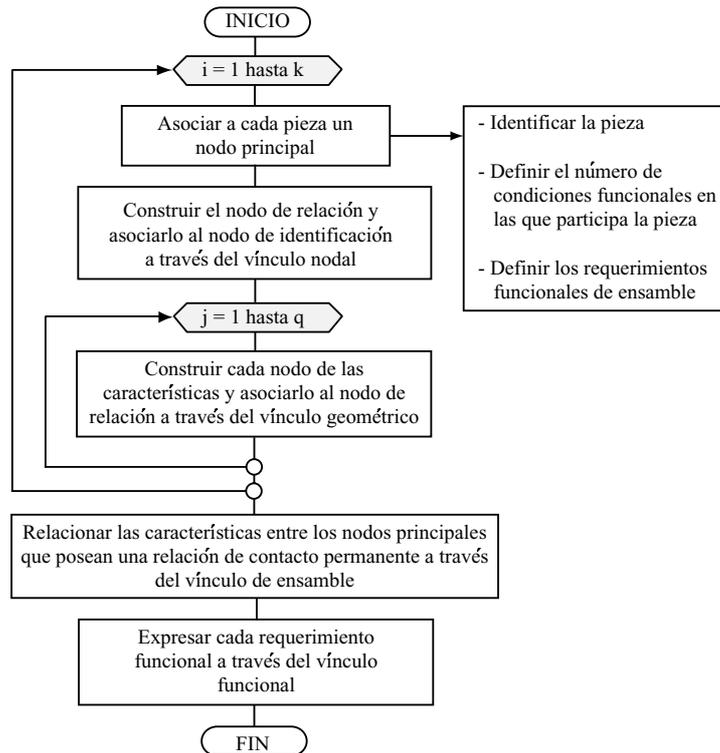


Figura 4.15. Etapas para la construcción del gráfico para el caso de los requerimientos funcionales dimensionales

En esta Figura, k representa la cantidad de piezas con importancia desde el punto de vista funcional en el ensamble y q representa el número de características relevantes para cada pieza que garantizan el desempeño del producto. Este algoritmo puede expresarse de forma secuencial de la siguiente manera:

- Paso 1. A cada pieza con importancia funcional en el conjunto mecánico, se le asocia un nodo principal.
- Paso 2. A cada nodo principal se le asocia un nodo de identificación. En este caso, se debe de identificar a la pieza según la etapa 2 (Figura 4.12), definir el número de condiciones funcionales en que participa el nodo principal —contador de condiciones funcionales— y definir los requerimientos funcionales de ensamble presentes en la pieza —identificador de las condiciones de ensamble.
- Paso 3. Se construye el nodo de relación y se le asocia al nodo de identificación a través del vínculo nodal.
- Paso 4. De acuerdo con lo expuesto en la etapa 3 (Figura 4.12), se deben de construir en el nodo principal, tantos nodos de características como características posean las piezas.
- Paso 5. Cada nodo de característica se une al nodo de relación a través del vínculo geométrico.
- Paso 6. Una vez se tengan todos los nodos principales construidos, las características entre nodos principales que posean una relación de contacto permanente, se unen a través del vínculo de ensamble.
- Paso 7. Cada requerimiento funcional se expresa entre las características de las piezas a través del vínculo funcional.

Para ejemplificar este tipo de casos, en la Figura 4.16 se representa un gráfico para el caso de un conjunto mecánico formado por tres piezas y donde intervienen dos requerimientos funcionales de dimensión máxima — $MÁX_1$ y $MÁX_2$.

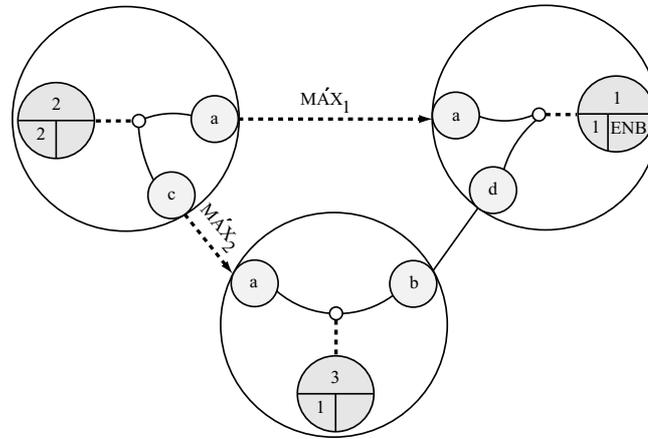


Figura 4.16. Gráfico para un caso con condiciones funcionales dimensionales

En los casos donde aparezcan requerimientos funcionales de coaxialidad, de concentricidad, de perpendicularidad y de angularidad; o de paralelismo máximo en conjuntos mecánicos con piezas cilíndricas, se utilizará el modelo expuesto anteriormente con algunas modificaciones. En la Figura 4.17 se puede apreciar la estructura o anatomía del método de la burbuja para estos casos.

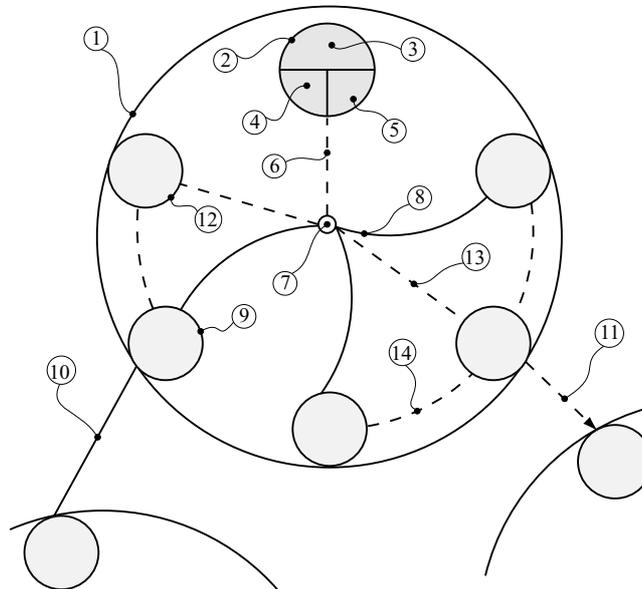


Figura 4.17. Etapas para la construcción del gráfico para el caso de los requerimientos funcionales geométricos

Respecto al gráfico para el primer tipo de gráfico, sólo se adicionan tres nuevos elementos al modelo, que son los siguientes:

- (12) Nodo del eje. Este nodo permite identificar a los diferentes ejes con importancia desde el punto de vista funcional en el nodo principal.
- (13) Indicador de eje. Permite relacionar a cada uno de los ejes representados en el nodo principal con el nodo de relación. Se representa por un línea recta discontinua.
- (14) Indicador de pertenencia. Permite mostrar a que característica en específico pertenece el eje representado por el nodo (12). Se representa a través de un arco discontinuo entre el nodo de la característica y el eje que le corresponde.

La construcción del método gráfico para el caso de los requerimientos funcionales geométricos se puede representar a través de un algoritmo, como muestra la Figura 4.18. En esta Figura, r representa la cantidad de piezas con importancia desde el punto de vista funcional en el ensamble y t representa el número de características relevantes para cada pieza que garantizan el desempeño del producto. El algoritmo de la Figura 4.18 puede expresarse de forma secuencial a través de los siguientes pasos:

- Paso 1. A cada pieza con importancia funcional en el conjunto mecánico, se le asocia un nodo principal.
- Paso 2. A cada nodo principal se le asocia un nodo de identificación. En este caso, se debe de identificar a la pieza según la etapa 2 (Figura 4.12), definir el número de condiciones funcionales en que participa el nodo principal —contador de condiciones funcionales— y definir los requerimientos funcionales de ensamble presentes en la pieza —identificador de las condiciones de ensamble.
- Paso 3. Se construye el nodo de relación y se asocia al nodo de identificación a través del vínculo nodal.
- Paso 4. De acuerdo con lo expuesto en la etapa 3 (Figura 4.12), se deben de construir en el nodo principal, tantos nodos de características como características posean las piezas.

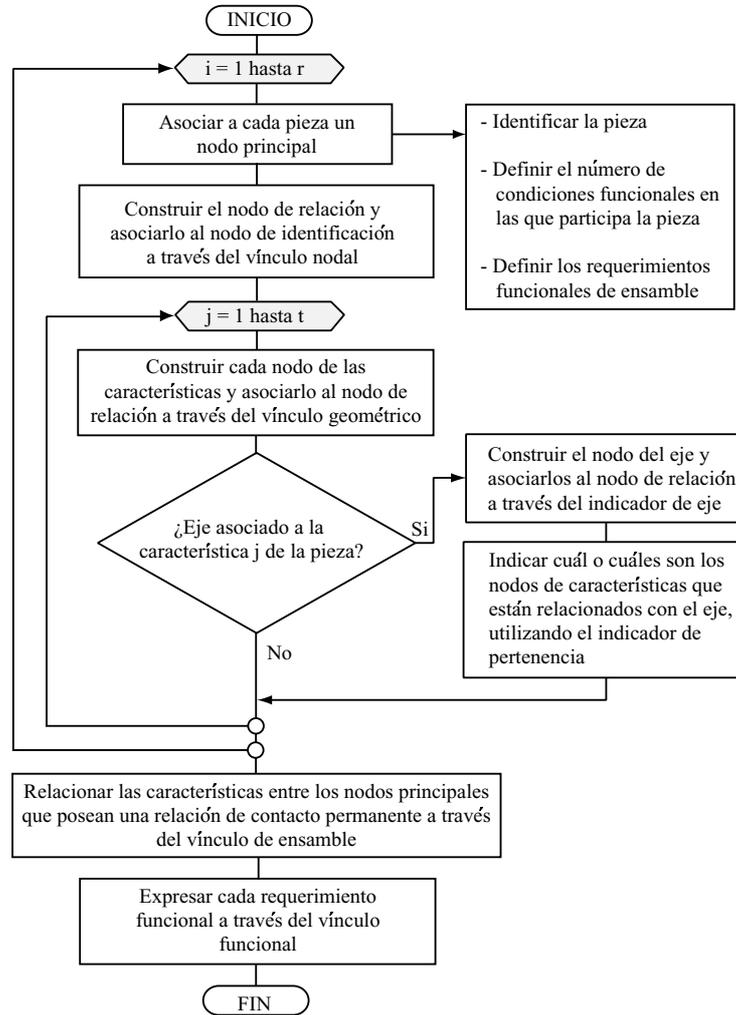


Figura 4.18. Algoritmo para la construcción del gráfico para el caso de los requerimientos funcionales geométricos

- Paso 5. En el caso de que un nodo posea un eje asociado, construir el nodo del eje y asociarlo al nodo de relación a través del indicador de eje. Utilizando el indicador de pertenencia, indicar cuál o cuáles son los nodos de características con los que está asociado, ir al paso 6. Si el nodo no posee un eje asociado, ir al paso 4.
- Paso 6. Cada nodo de característica se une al nodo de relación a través del vínculo geométrico.

Paso 7. Una vez se tengan todos los nodos principales construidos, las características entre nodos principales que posean una relación de contacto permanente, se unen a través del vínculo de ensamble.

Paso 8. Cada requerimiento funcional se expresa entre las características de las piezas a través del vínculo funcional.

Para ejemplificar este tipo de casos, en la Figura 4.19 se representa un gráfico para el caso de un conjunto mecánico representado en la Figura 4.13, formado por cuatro piezas y donde interviene un requerimiento funcional de paralelismo máximo $-PLM$.

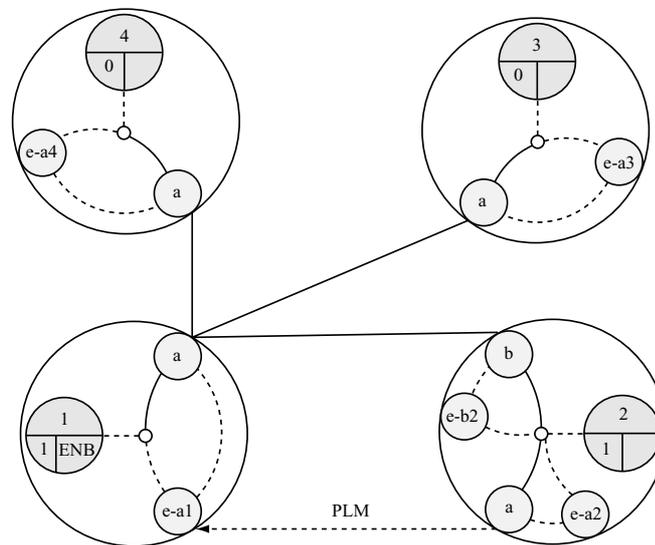


Figura 4.19. Gráfico para el caso de la Figura 4.13

Una vez que se ha construido el gráfico por el método de las burbujas, las cadenas dimensionales pueden ser identificadas de una manera fácil. A continuación se describen la secuencia y las consideraciones a tener en cuenta.

Formulación de las cadenas dimensionales a partir del gráfico obtenido por el método de las burbujas

La fase correspondiente a la formulación de las cadenas de cotas, a partir del gráfico obtenido en la etapa anterior, es sin dudas el paso más relevante del método propuesto y constituye la base para la síntesis de tolerancias en la etapa del diseño básico o de detalle.

El objetivo de esta fase del método de las burbujas es la formación de las cadenas dimensionales, tomando como base la información resultante de las etapas previas —piezas funcionalmente importantes en el conjunto mecánico, características más relevantes de cada una de las piezas en cuanto a funcionalidad y contactos entre las mismas. Una cadena de cotas o cadena dimensional describe las relaciones existentes entre un requerimiento funcional y las dimensiones individuales de un determinado ensamble. Estas relaciones están contenidas de manera implícita en el gráfico obtenido en la etapa abordada anteriormente.

El procedimiento a seguir para la resolución de las cadenas de cotas es el que se expresa en la Figura 4.20 — u y s son el número de requerimientos funcionales—, y se basa en los siguientes aspectos:

- a) Los datos de partida lo constituyen la identificación de los requerimientos funcionales y el gráfico del ensamble obtenido por el método de las burbujas. Estos datos son de vital importancia para los posteriores pasos en la determinación de las cadenas de cotas.
- b) Antes de comenzar a formular la cadena de cotas correspondientes a cada requerimiento funcional, hay que diferenciar a cual de los casos pertenece el requerimiento, si a los casos dimensionales o a los casos geométricos —existen casos en los que en un mismo gráfico pueden coincidir ambos tipos de problemas. Cada requerimiento funcional —Figura 3.5—, constituye un eslabón de cierre de la cadena dimensional.

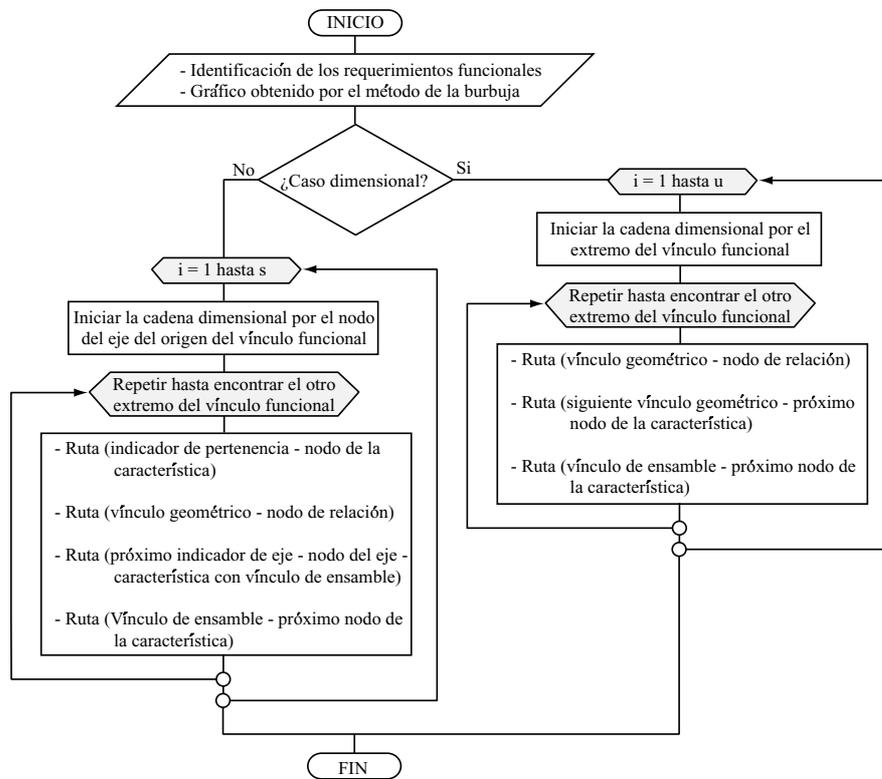


Figura 4.20. Algoritmo para la formulación de las cadenas de cotas

- c) En los problemas que contengan requerimientos funcionales dimensionales, la cadena de cotas se debe de iniciar por el extremo del vínculo funcional del requerimiento en cuestión, luego se debe de ejecutar un proceso iterativo hasta encontrar el otro extremo del vínculo funcional.
- d) El proceso iterativo establece lo siguiente: seguir la ruta que define el vínculo geométrico de la característica hasta el nodo de relación; continuar por el vínculo geométrico hasta el próximo nodo de la característica; y seguir el vínculo de ensamble de esta característica hasta el próximo nodo de la característica.
- e) Se debe de repetir el paso (d) de manera iterativa siguiendo una trayectoria en forma de lazo y con la menor cantidad posible de eslabones. Esta secuencia se debe de realizar para cada uno de los requerimientos funcionales del conjunto mecánico.

En la Figura 4.21 se muestra un ejemplo de cómo se obtiene la cadena de cotas para el requerimiento funcional $MÁX_2$ del gráfico de la Figura 4.16 —ensamble mecánico compuesto por tres piezas y dos requerimientos funcionales.

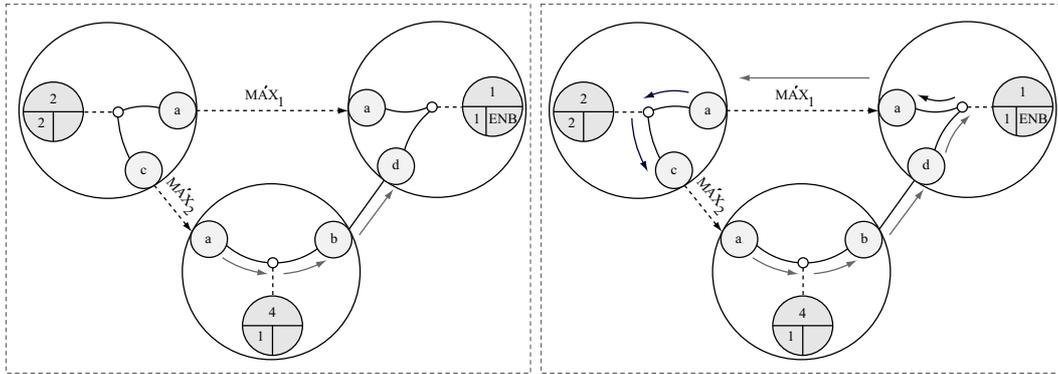


Figura 4.21. Determinación de la cadena de cotas para el requerimiento funcional $MÁX_2$ para el caso del gráfico de la Figura 4.16

- f) Cuando en un problema existen requerimientos funcionales geométricos, el procedimiento a seguir es similar al descrito anteriormente con algunas modificaciones. A diferencia de los casos dimensionales, la cadena de cotas se debe de iniciar por el nodo del eje del origen del vínculo funcional del requerimiento en cuestión.
- g) Proceso iterativo hasta encontrar el otro extremo del vínculo funcional que consiste en: seguir el indicador de pertenencia del nodo del eje hasta el nodo de la característica; continuar por el vínculo geométrico hasta el nodo de relación.
- h) Continuar por el indicador de eje hasta el nodo del eje correspondiente al próximo nodo de la característica que posea un vínculo de ensamble; seguir el vínculo de ensamble de esa característica hasta el próximo nodo de la característica.
- i) Repetir los pasos (g) y (h) de manera iterativa, siguiendo una trayectoria en forma de lazo y con la menor cantidad posible de eslabones.

En los casos de ensambles mecánicos de más de tres piezas donde intervienen los requerimientos funcionales geométricos, existirá un nodo de la característica con dos vínculos de ensamble. Esta particularidad indica la posibilidad de seguir varias rutas para la obtención de la cadena de cotas —ver ejemplo en el Capítulo 5. En la Figura 4.22 se muestra un ejemplo de cómo se obtiene la cadena de cotas para el requerimiento funcional geométrico de paralelismo máximo —PLM— del gráfico de la Figura 4.19.

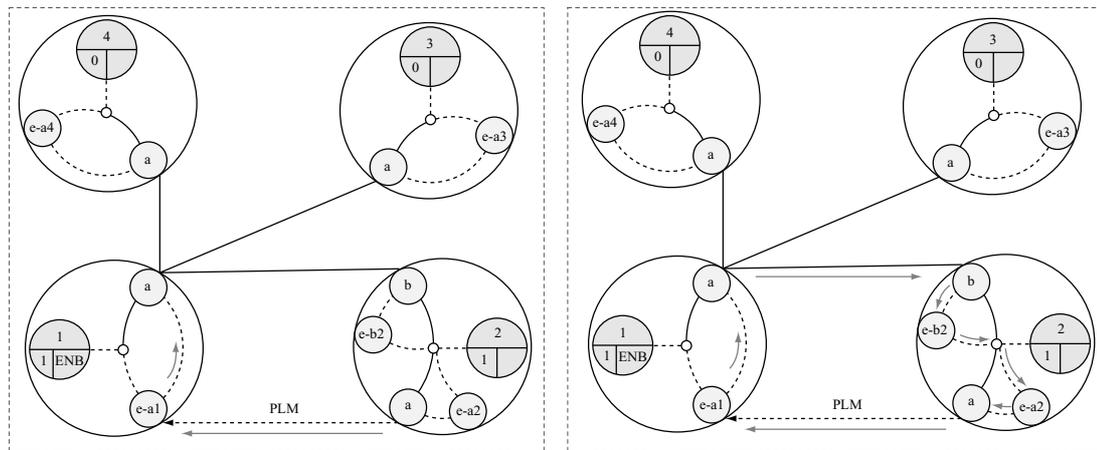


Figura 4.22. Determinación de la cadena de cotas para el requerimiento funcional PLM para el caso del gráfico de la Figura 4.19

El establecimiento de las cadenas de cotas puede dar como resultado, que para un determinado requerimiento funcional en el conjunto mecánico, se obtengan cadenas con más eslabones de los necesarios —caso de sobredimensionamiento de la cadena. En estos casos, el modelo sólo muestra las soluciones para su inspección visual.

Una de las posibles mejoras a este modelo, puede ser el desarrollo de un algoritmo interno al módulo de formulación de las cadenas de cotas, que permita optimizar las rutas que se establecen para las cadenas dimensionales en conjuntos mecánicos con un número elevado de requerimientos funcionales.

En general, la secuencia para generar las cadenas de cotas, como parte del método de las burbujas se puede representar en forma de pseudocódigo para su posterior informatización. El sistema informático de soporte al método de las burbujas estaría compuesto por un módulo o procedimiento principal y tres rutinas o procedimientos.

El módulo principal tendría la función del control y llamada de las rutinas que conforman el sistema. La rutina o el procedimiento de *Identificación*, permitiría la entrada de los datos necesarios a través de diálogos, para poder formular las cadenas de cotas. El procedimiento *Gráfico_del_método* estaría destinado a la construcción del gráfico del método de las burbujas, a partir del dibujo de conjunto y de los datos introducidos en el procedimiento de *Identificación*. Este gráfico seguiría la secuencia expuesta anteriormente en función del tipo de casos que se le pase como parámetro de entrada.

El procedimiento *Generar_cadena_de_cotas* sería el procedimiento más importante de acuerdo con el método de las burbujas, pues es el que permitiría formular las cadenas de cotas para todos los requerimientos funcionales presentes en un ensamble mecánico. Esta rutina sigue la secuencia expuesta anteriormente en función del tipo de casos que se le pase como parámetro de entrada.

A continuación se expone en forma de pseudocódigo, la estructura de un posible sistema informático de soporte al método de las burbujas.

Procedimiento principal: Método_de_las_burbujas

/ Procedimiento principal del módulo del método de las burbujas */*

```
{  
    Identificación  
    Gráfico_del_método (tipo_de_caso)  
    Generar_cadena_de_cotas (tipo_de_caso)  
}
```

Procedimiento: Identificación

/ Procedimiento para identificar los elementos necesarios para el desarrollo del método de las burbujas */*

```

{
  - Identificar_requerimientos_funcionales
  Repetir para cada requerimiento funcional
    - Identificar_piezas_con_importancia_funcional
    Repetir para cada pieza
      - Identificar_características_de_funcionalidad
      Fin de repetir para cada pieza
    Fin de repetir para cada requerimiento funcional
}

```

Procedimiento: Gráfico_del_método(tipo_de_caso)

/ Procedimiento para construir el gráfico del método de las burbujas */*

```

{
  Si (tipo_de_caso = Dimensional) Entonces
  {
    Repetir para cada pieza
    - Asociar a cada pieza un nodo principal
    - Construir el nodo de relación y asociarlo al nodo de
      identificación a través del vínculo nodal
    Repetir para cada nodo
    - Construir los nodos de las características y los vínculos
      geométricos
    Fin de repetir para cada nodo
    Fin de repetir para cada pieza
    - Relacionar las características a través del vínculo de ensamble
    - Expresar cada requerimiento funcional a través del vínculo funcional
  }
}

```

```

Si (tipo_de_caso = Geométrico) Entonces
{
    Repetir para cada pieza
    - Asociar a cada pieza un nodo principal
    - Construir el nodo de relación y asociarlo al nodo de
      identificación a través del vínculo nodal
    Repetir para cada nodo
    - Construir los nodos de las características y los vínculos
      geométricos
    Si (existe un eje asociado) entonces
    - Construir el nodo del eje
    - Asociarlo al nodo de relación a través del
      indicador de eje
    - Utilizar el indicador de pertenencia
    Fin de la condición
    Fin de repetir para cada nodo
    Fin de repetir para cada pieza
    - Relacionar las características a través del vínculo de ensamble
    - Expresar cada requerimiento funcional a través del vínculo
      funcional
}
}

```

Procedimiento: Generar_cadena_de_cotas (tipo_de_caso)

/ Procedimiento para generar las cadenas de cotas de cada requerimiento funcional */*

```

{
    Si (tipo_de_caso = Dimensional) Entonces
    {
        Repetir para cada requerimiento funcional
        - Iniciar la cadena dimensional por el extremo del vínculo
          funcional
        Repetir
    }
}

```

- Seguir la ruta que establece el vínculo geométrico de la característica hasta el nodo de relación
- Continuar por el siguiente vínculo geométrico hasta el próximo nodo de la característica
- Seguir el vínculo de ensamble de esa característica hasta el próximo nodo de la característica
- Seguir una trayectoria en forma de lazo y con la menor cantidad de eslabones posibles

Hasta encontrar el otro extremo del vínculo funcional

Fin de repetir para cada requerimiento funcional

}

Si (tipo_de_caso = Geométrico) Entonces

{

Repetir para cada requerimiento funcional

- Iniciar la cadena dimensional por el nodo del eje del origen del vínculo funcional

Repetir

- Seguir el indicador de pertenencia del nodo del eje hasta el nodo de la característica
- Continuar por el vínculo geométrico hasta el nodo de relación
- Continuar por el próximo indicador de eje hasta el nodo del eje correspondiente al próximo nodo de la característica que posea un vínculo de ensamble
- Seguir el vínculo de ensamble de esa característica hasta el próximo nodo de la característica
- Seguir una trayectoria en forma de lazo y con la menor cantidad de eslabones posibles

Hasta encontrar el extremo del vínculo funcional

Fin de repetir para cada requerimiento funcional

}

}