

2

Planificación de secuencia de desensamblado

2.1. Introducción

En este capítulo se tratan los métodos de planificación de secuencias de desensamblado existentes en la bibliografía. Además se presenta un método de planificación original aportado en esta tesis. El cual se basa en la generación de un modelo relacional del producto que permite mediante una jerarquización de los componentes que lo forman, calcular la secuencia de desensamblado.

De cara a planificar el desensamblado de un producto hay que tener en cuenta si se realiza un desensamblado parcial o total [165], dado que según la opción elegida se deben seguir unas u otras estrategias. Esta tesis presenta aportaciones tanto en desensamblado parcial como total.

El desensamblado parcial consiste en desensamblar un determinado componente o conjunto de ellos, sin necesidad de separar todos los componentes del producto.

El desensamblado total pretende separar todos los componentes del producto obteniendo cada uno de los componentes por separado.

A la hora de realizar una planificación para desensamblar un producto un aspecto a tener en cuenta es la representación que se va a realizar de él. Ésta determina el tipo de operario necesario para poder definirla: cualificado o no cualificado. La representación expresa el producto de manera simbólica, las distintas piezas que lo forman así como las relaciones entre ellas. Para ello existen en la bibliografía múltiples métodos para llevarlo a cabo, ya sea por medio de representaciones que reflejan distintas materias primas que

componen un producto, aquellas que intentan recuperar ciertas piezas, otras que detallan todos y cada uno de los componentes y sus características, etc.

Una determinada representación está preparada para un operario en concreto de manera que hay esquemas que intentan reflejar el producto desde el punto de vista del diseñador, otros desde el punto del usuario, otros desde las relaciones entre los distintos componentes, otros desde las características de los componentes, etc. Esto no quiere decir que una forma de expresar un producto excluya a la otra, pero a la hora de realizar el diseño se debe tener en cuenta a quién va dirigida la representación, y como se dijo anteriormente, en la fase de diseño del producto, se deben reflejar las características del mismo, y cuando sea posible, considerar también los métodos para su desensamblado. Esta manera de ver la representación de un producto es muy útil si se realiza desde el primer momento del ciclo de vida, pero en la actualidad muchos productos no tienen una representación pensada para el desensamblado con lo que se debe buscar una manera de reflejar sus características. Dicha representación interesa que pueda ser realizada por un operario que tenga conocimientos del producto en particular, sin necesidad de tener grandes conocimientos técnicos, esta es una de las características que se plantea en la representación aportada por esta tesis. Dado que al tratarse de productos ya diseñados interesa poder introducirlos fácilmente en un programa que calcule la secuencia de desensamblado.

A la hora de seleccionar una manera para representar un producto a desensamblar hay que realizar un estudio sobre cuáles son las características del mismo que se quieren reflejar en el esquema, el tipo de desensamblado a efectuar, a quién va dirigida dicha representación, etc.

Las características que se quieran representar del producto influyen también en la representación, en el sentido de reflejar hasta que nivel de detalle se quiere llegar a definir el mismo, es decir, qué componentes forman el producto. Por ejemplo en un ordenador se pueden considerar como componentes las tarjetas, los discos duros pero no los chips que componen dichas tarjetas y discos duros. Con esta representación no se pueden desensamblar los distintos chips, pero si no se desea llegar a ese nivel de desensamblado el esquema es correcto y además más sencillo que si se tienen en cuenta dichas características. Esto quiere decir que para un mismo producto se dan distintas representaciones según el objetivo perseguido en el desensamblado. Esta profundidad se puede seleccionar en base a múltiples criterios, tanto económicos como ecológicos, según el objetivo final perseguido.

Además de definir el nivel de detalle en la representación hay que dejar claro hasta que punto es rentable el desensamblado de un producto, ya que su desensamblado total puede no serlo, pero uno parcial sí. Para calcular hasta donde es rentable realizar el desensamblado se utilizan técnicas que maximizan el beneficio obtenido en un proceso de desensamblado. Estas técnicas, que permiten calcular hasta qué punto es rentable desensamblar un producto, se denominan en la bibliografía como *disassembly leveling* [20] [27] [37] [38] [39] [53] [65] [146] [152] [157] [172] [187] [194] [195] [205] [210] [301] [306] [307].

La información que se necesita de cada componente así como de las relaciones entre ellos dependen del tipo de desensamblado a realizar. Si se

quiere realizar un desensamblado para el reciclado del producto entonces lo que interesara reflejar en la representación son los distintos materiales de los componentes ya que el desensamblado de dos componentes conjuntamente es correcto si están compuestos por el mismo material, puesto que no habría ningún problema para su reciclado. Si por el contrario se desea realizar un desensamblado para mantenimiento o para la reutilización de los componentes, interesa en vez de una representación que refleje los distintos materiales, una representación que tenga en cuenta los componentes que pueden ser sustituidos o recuperados así como los enlaces que tienen entre sí y cómo se pueden eliminar.

Lo que se persigue con una estrategia de planificación del proceso de desensamblado es obtener una secuencia de las operaciones a realizar para quitar los componentes de un producto necesarios para acceder a un determinado componente o para separarlos todos. La cantidad de posibles soluciones crece exponencialmente con el número de componentes que posee el producto, con lo cual calcular la solución óptima requiere de técnicas adecuadas que van apareciendo paulatinamente en la literatura que consiguen mejorar la generación de las secuencias de desensamblado. Estas técnicas se describen en el siguiente apartado.

Este incremento en la cantidad de soluciones existentes en la generación de secuencias de desensamblado es debido a que se trata de un problema NP-completo [191]. Por ejemplo, un producto con 3 componentes puede tener hasta $3! = 6$ secuencias distintas de desensamblado, mientras que un producto con 10 componentes podría tener hasta $10! = 3.228.800$ secuencias de desensamblado distintas. Aunque, considerando las restricciones existentes entre los componentes, se reduce el número de secuencias a analizar, para obtener la óptima, la cantidad de soluciones se supone que sigue siendo grande para productos complejos, lo que implica el desarrollo de heurísticas y métodos para calcular las secuencias de desensamblado de un producto [90].

2.2. Estado del arte

En este apartado se describen las maneras de representar un producto presentes en la bibliografía [92] [158] [199] [262] [302], realizando una clasificación según el método de representación del producto utilizado.

2.2.1. Grafos

Una de las maneras más extendidas para calcular la planificación de desensamblado consiste en la utilización de grafos que expresan las relaciones entre los componentes, donde los nodos se corresponden con los componentes o agrupaciones de ellos y las aristas representan las relaciones existentes entre ellos.

La representación de productos mediante grafos se puede clasificar en tres estrategias generales: Las que utilizan grafos de componentes-enlaces [148] [149] [150] [299] [300] [301] [308], las que utilizan grafos dirigidos [106] [213] [214] y las que utilizan grafos and/or [62] [89] [106] [107] [163] [206] [303].

La representación mediante grafos de componentes-enlaces la encontramos en [148] [150] [299] [300] [301] donde se plantea la

representación del producto mediante un grafo como el mostrado en la Figura 2.1. en el que cada nodo representa a un componente y las aristas expresan relaciones, uniones, entre los componentes.

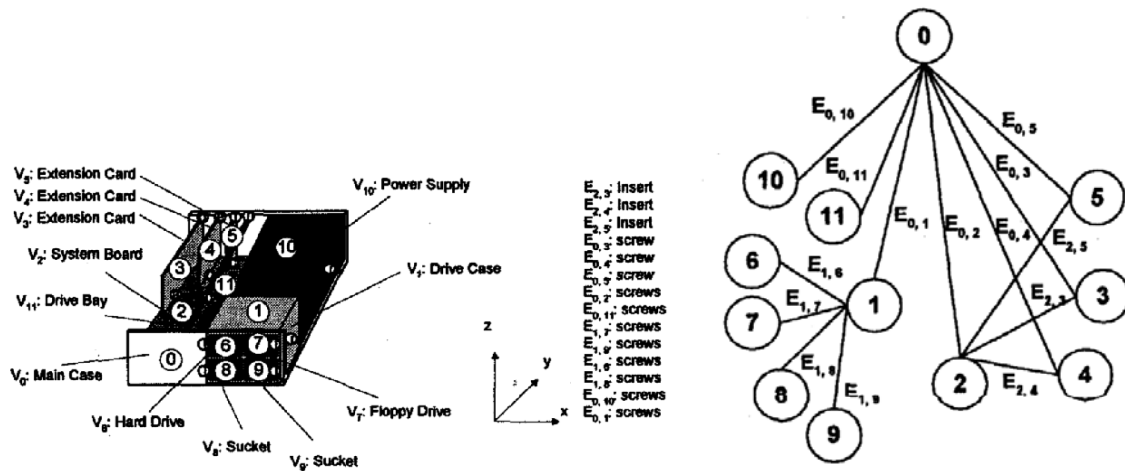


Figura 2.1: PC desensamblado parcialmente y su grafo de componentes-enlaces (Fuente: [300]).

El método que plantea para calcular la secuencia de desensamblado consiste en reducir el grafo a un árbol (Figura 2.2) de tal manera que se tiene una representación más sencilla para calcular cual es la secuencia de desensamblado de un determinado componente.

La secuencia de desensamblado consiste en eliminar los nodos padre, desde el componente que se quiere desensamblar, hasta llegar al nodo raíz del árbol. De manera que se van eliminando las uniones correspondientes a cada una de las aristas.

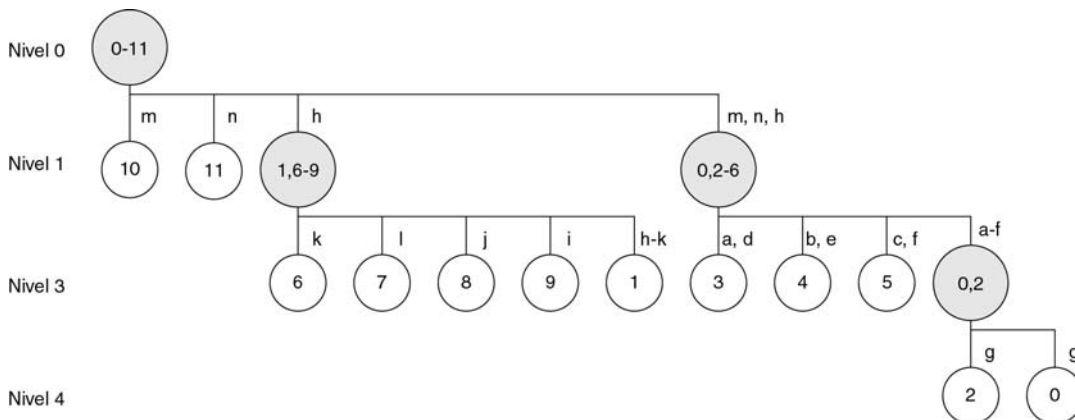


Figura 2.2: Árbol de desensamblado para el grafo de la Figura 2.1 (Fuente: [300])^{*}.

Otra representación mediante un grafo de componentes-enlaces la encontramos en [308], donde el grafo consiste en una combinación de datos geométricos, topológicos y funcionales del producto.

^{*} Donde: $m=E_{0,10}$; $n=E_{0,11}$; $h=E_{0,1}$; $k=E_{1,6}$; $l=E_{1,7}$; $j=E_{1,8}$; $i=E_{1,9}$; $a=E_{0,3}$; $b=E_{0,4}$; $c=E_{0,5}$; $d=E_{2,3}$; $e=E_{2,4}$; $f=E_{2,5}$; $g=E_{0,2}$.

La construcción del grafo se realiza en función de las superficies de contacto entre cada par de componentes así como del tipo de contacto existente entre ellas. En la Figura 2.3 se muestra un producto compuesto por tres componentes así como la identificación de las superficies de cada uno de los componentes que lo forman.

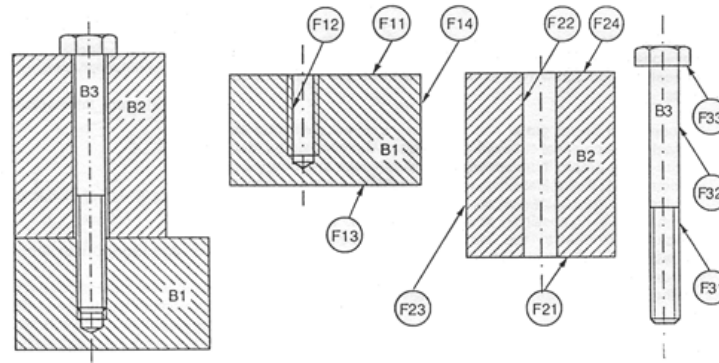


Figura 2.3: Representación de un producto para generar un grafo de componentes-enlaces (Fuente: [308]).

Utilizando esta información se ha generado el grafo de relaciones de la Figura 2.4.

El algoritmo planteado de esta manera realiza una simplificación del grafo obtenido originalmente, esta simplificación se realiza en dos etapas. En la etapa de análisis se obtiene la estructura topológica, representada por medio de relaciones en el grafo entre características de los componentes. La segunda etapa consiste en la simplificación del grafo combinando las referencias topológicas del producto con los componente físicos que se consideran para crear el producto (Figura 2.4). Tras esto realiza una búsqueda en el grafo del componente a desensamblar, y para desensamblarlo hay que eliminar las uniones que posee con el resto de componentes, es decir, eliminar las aristas que lo unen al resto del grafo.

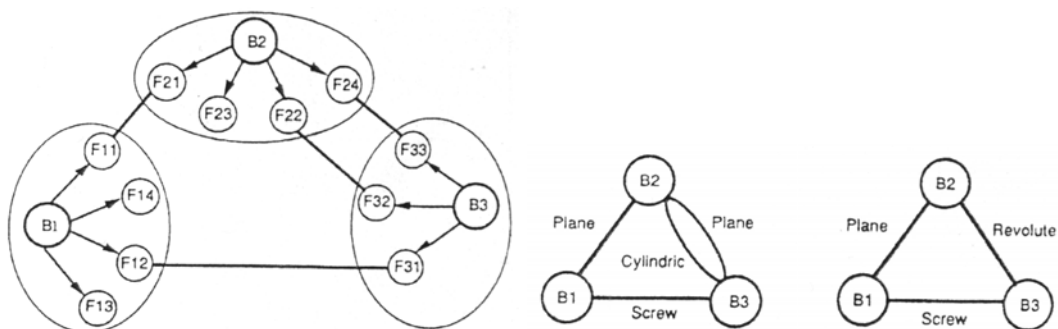


Figura 2.4: Grafo de relaciones, grafo a nivel de producto y grafo del producto (Fuente: [308]).

El uso de grafos dirigidos para representar los productos [106] [213] [214], donde los nodos son los componentes y las aristas se corresponden con restricciones que vienen dadas por la precedencia entre los componentes, (Figura 2.5) es otro método utilizado para calcular secuencias de desensamblado.

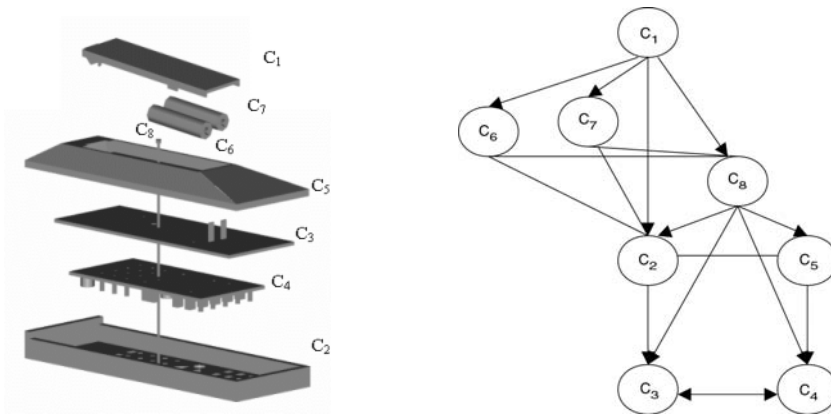


Figura 2.5: Producto y grafo dirigido correspondiente (Fuente: [214]).

En base a la información contenida en el grafo, así como a los atributos de cada componente: operaciones necesarias para desensamblarlo, valor económico, toxicidad, etc., se calcula mediante unas ecuaciones matemáticas la secuencia óptima de desensamblado de un componente [214] o un conjunto de ellos [213].

Este método resulta eficaz a la hora de maximizar una función de coste para obtener el mayor beneficio en el desensamblado del producto.

La utilización de grafos and/or [62] [89] [106] [107] [163] [206] [303] es una de las técnicas más extendidas ya que permite una gran cantidad de posibilidades de desensamblado.

Esta representación expresa de forma compacta las relaciones entre los componentes de un producto así como las opciones de ensamblar cada uno de los componentes con los demás. Un grafo and/or tiene como nodos agrupaciones de componentes y sus hojas corresponden a componentes individuales. Juntando dos hojas se consigue un nodo intermedio que representa un subensamblado del producto, combinando estos nuevos subensamblados con el resto de nodos del grafo se van teniendo nodos con una mayor cantidad de componentes, este proceso sigue hasta que se llega al nodo raíz que representa el componente completamente ensamblado (Figura 2.6).

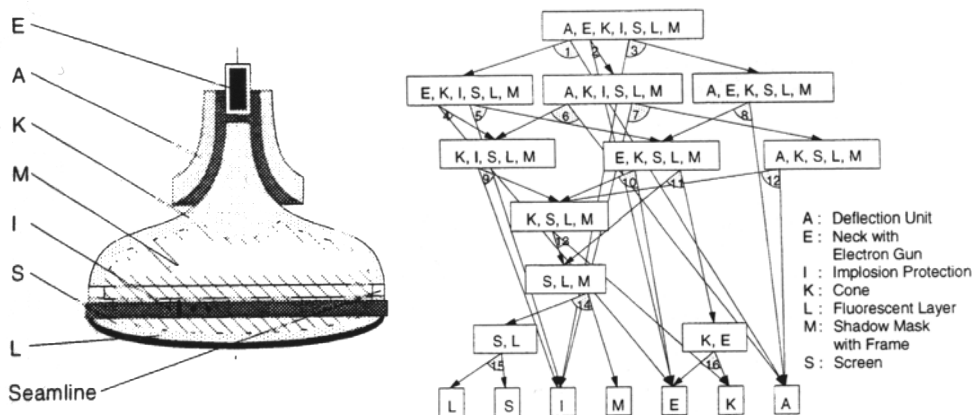


Figura 2.6: Estructura y grafo and/or de un tubo de rayos catódicos (Fuente: [206]).

Las relaciones entre los componentes del grafo pueden ser de dos tipos, representadas mediante las aristas "and" u "or" como indica el nombre del grafo. Un conjunto de aristas se definen como "and" si para poder llevar a cabo el desensamblado deben expandirse, realizar el desensamblado de todos los nodos que conectan dichas aristas. Un conjunto de aristas se definen como "or" si para realizar el desensamblado hay que seguir una cualquiera de ellas.

Cada autor presenta un método distinto de resolver el problema del cálculo de la secuencia de desensamblado basándose en el grafo and/or, pero las estrategias se pueden resumir en recorrer el grafo desde el nodo que representa al componente o al conjunto de componentes que se desea desensamblar y buscar el mejor camino para llegar al nodo raíz con lo que la secuencia de desensamblado será la obtenida en este recorrido realizándola desde el nodo raíz hasta el nodo a desensamblar.

Una extensión de los grafos and/or consiste en la incorporación de la función "xor", lo que amplía la información de los productos que se pueden expresar con sólo relaciones "and" y "or" [190] para calcular las correspondientes secuencias de desensamblado.

2.2.2. Características geométricas

La utilización de información geométrica para realizar una planificación para el desensamblado de un producto resulta una técnica cada vez más extendida, especialmente a la hora de realizar el diseño de nuevos productos, ya que permite comprobar si un producto tendrá un fácil desensamblado cuando termine su ciclo de vida útil.

Los planteamientos más actuales basados en características geométricas, utilizan un modelo CAD para generar un grafo, gracias a las restricciones que se pueden obtener directamente del diseño del producto, sin la necesidad de intervención de un operador [62] [160] [248]. En base al grafo obtenido se calcula la secuencia de desensamblado [276] [279].

Un primer planteamiento consiste en utilizar una representación basada en polígonos, de tal manera que cada componente se describe como un conjunto de polígonos; además un componente cuando esté junto a otro los polígonos que los forman tendrán una relación de contacto (Figura 2.7) [161] [243] [247] [248] [249] [250].

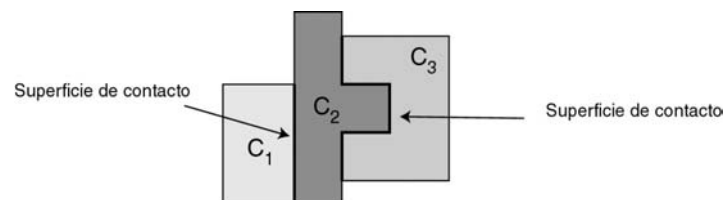


Figura 2.7: Superficies de contacto del producto ensamblado (Fuente: [243]).

Partiendo de la información geométrica, generan un grafo con la topología del producto (Figura 2.8), que permite calcular cual es la secuencia de desensamblado a llevar a cabo para un determinado componente.

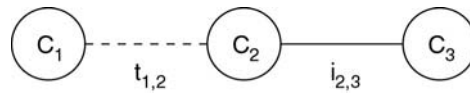


Figura 2.8: Grafo de topología del producto ensamblado de la Figura 2.7 (Fuente: [243]).

Estos algoritmos se basan en la utilización de polígonos convexos [24] [25], transformando aquellos que no lo son tal y como se muestra en la Figura 2.9 para el componente c_2 del producto de la Figura 2.7.

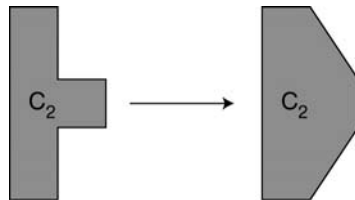


Figura 2.9: Transformación de un polígono no convexo en convexo (Fuente: [243]).

Teniendo en cuenta las características que se obtienen de los algoritmos basados en características geométricas se puede decir que obtienen secuencias óptimas de desensamblado para sistemas 1-desensamblado. Un sistema de desensamblado es 1-desensamblado cuando se utiliza un sólo movimiento lineal para desensamblar un componente.

En [248] se presenta un algoritmo para calcular las secuencias óptimas de desensamblado, basado en la propagación de ondas. Este método consiste en simular la propagación de una onda desde el componente a desensamblar hasta llegar a un componente que se encuentre accesible, de tal manera que, realizando la secuencia calculada en orden inverso, se puede desensamblar el componente correspondiente (Figura 2.10).

Este mismo método ha sido ampliado en [62] para el cálculo de una secuencia de desensamblado conjunta de varios componentes del producto.

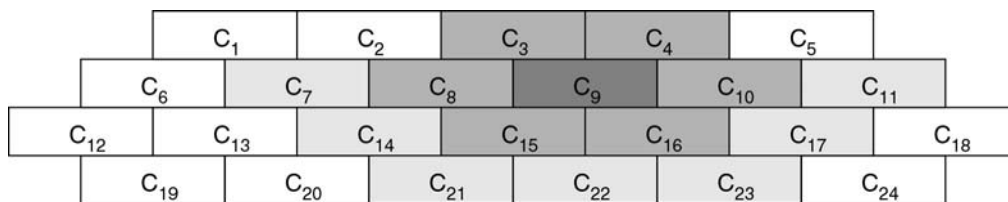


Figura 2.10: Método de propagación de ondas, ondas desde el componente c_9 (Fuente: [248]).

Una de las ventajas que proporciona este método se basa la posibilidad de utilizar los modelos geométricos que proporcionan programas CAD comerciales para definir los componentes del producto. Como principal desventaja hay que señalar que sólo contempla movimientos lineales, en una única dirección, aunque puede considerar otros tipos de movimientos como casos especiales, por ejemplo, en el caso de los tornillos, los considera como elementos especiales que requieren un tipo de movimiento particular, de manera que, utilizando consideraciones adicionales, puede incluir componentes que requieran movimientos de desensamblado no lineales.

En esta tesis se aporta una ampliación de estos sistemas de desensamblado ya que se amplían para eliminar las restricciones que llevan

impuestos los sistemas 1-desensamblado, permitiendo realizar más de un movimiento lineal para desensamblar un componente.

Otra manera de utilizar las características geométricas para calcular la secuencia de desensamblado se plantea en [89] donde en base a la representación geométrica del producto y a restricciones de precedencia (Figura 2.11) se calcula un grafo and/or desde el que se va generando la secuencia de desensamblado.

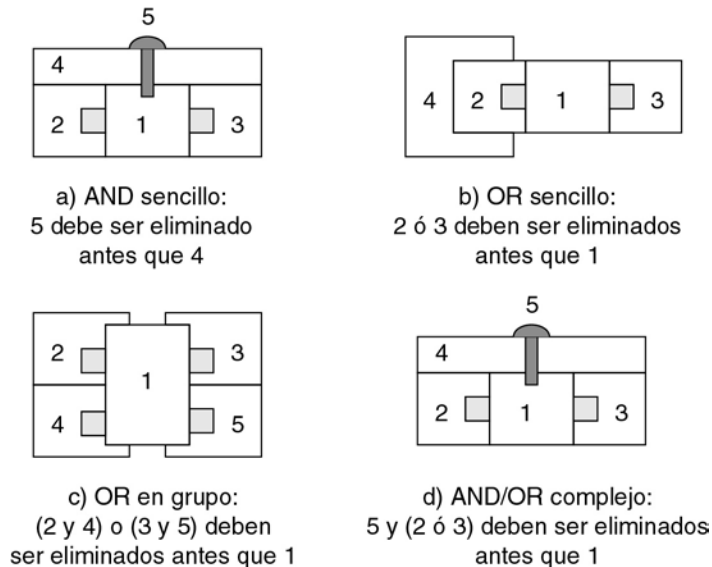


Figura 2.11: Restricciones geométricas para calcular el grafo and/or (Fuente: [89]).

El grafo and/or se calcula teniendo en cuenta las restricciones que definen los movimientos posibles a realizar por un componente, de tal manera que el grafo tiene la información sobre los movimientos a realizar para poder separar un componente del resto.

2.2.3. Árboles

Otro método para realizar el cálculo de una secuencia de desensamblado consiste en partir de una representación arborescente del producto [48] [180].

La utilización de estrategias arborescentes permite una paralelización de las tareas a realizar por el sistema de desensamblado [48] considerando las distintas posibilidades de separación de las piezas [28] de un producto.

Una representación arborescente se plantea en [180] con la idea de realizar un desensamblado en tiempo real de un producto. La estrategia planteada permite, por medio de pesos asignados a cada rama del árbol, ir eligiendo en tiempo real cual es la estrategia a seguir para desensamblar un componente, teniendo en cuenta posibles diferencias durante el proceso real respecto a la planificación inicialmente planteada (Figura 2.12).

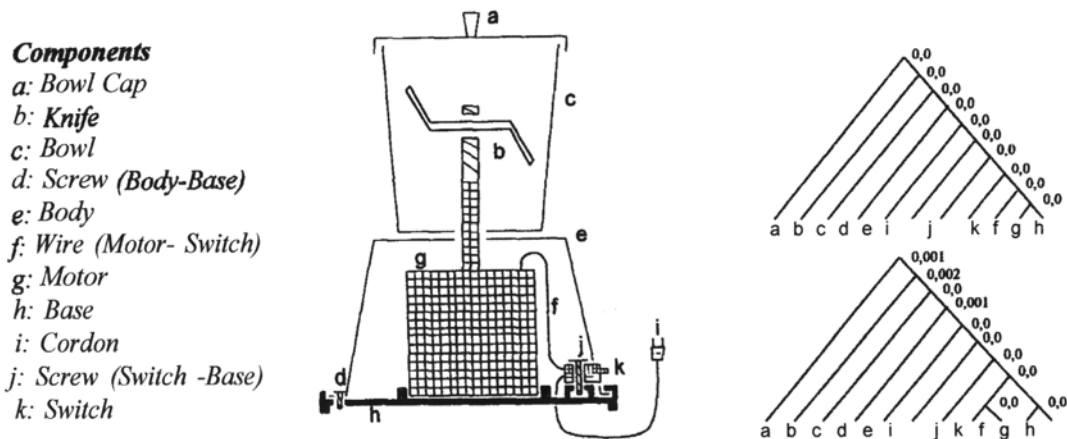


Figura 2.12: Componentes de una picadora eléctrica y árboles para el desensamblado (Fuente: [180]).

En el árbol se tiene contemplada una estrategia de planificación con un coste determinado; por tanto existe un árbol para cada posible planificación de desensamblado. De esta manera el algoritmo selecciona la mejor inicialmente y si no puede seguir realizando el desensamblado según dicho árbol debido a algún componente dañado, la operación prevista no se puede realizar, etc., entonces selecciona otro árbol que sí que permita continuar desde el punto donde ocurrió el problema. Esta estrategia sirve para aplicarla en tiempo real, siempre que se disponga de productos no muy complejos, ya que ello implicaría una gran cantidad de estrategias posibles con el consiguiente coste de almacenarlas.

2.2.4. Redes de Petri

La utilización de redes de Petri tiene una similitud con la representación usada para los grafos and/or, permitiendo generar a partir de un grafo and/or la correspondiente red de Petri para realizar el desensamblado del producto [188] [189] [190] [261] [290] [298] [310].

Donde las transiciones representan acciones de desensamblado y por tanto deben tener una o más entradas, y al menos dos salidas, ya que el producto completo se representa por el estado inicial y el resto de estados se corresponden con subensamblados del producto. Un ejemplo de un producto diseñado y la correspondiente red de Petri de desensamblado se muestra en la Figura 2.13.

El uso de redes de Petri permite utilizar las implementaciones existentes de las mismas para realizar los diseños de los procesos de desensamblado. Además, mediante el ajuste del instante de disparo de las transiciones, se pueden crear estrategias de desensamblado adaptativas.

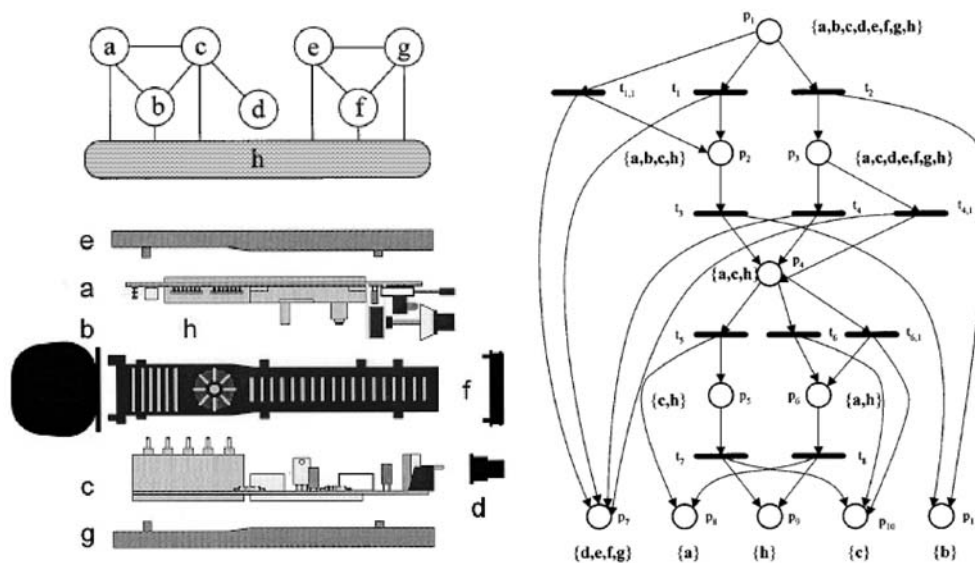


Figura 2.13: Producto y su red de Petri de desensamblado (Fuente: [310]).

2.2.5. Otros métodos

En este apartado se presentan otros métodos para calcular las secuencias de desensamblado que no están tan extendidos como los anteriores, entre los que se incluyen las redes neuronales, los sistemas expertos, los algoritmos genéticos, etc.

2.2.5.1. Redes neuronales

Las redes neuronales también pueden utilizarse para generar secuencias de desensamblado [110]. Esta perspectiva busca maximizar una función de beneficio para los materiales recuperados, pudiendo utilizar redes de Hopfield, que es uno de los métodos más extendidos para resolver problemas de optimización con redes neuronales.

Este método permite realizar un planteamiento que resuelve en paralelo los problemas de desensamblado.

2.2.5.2. Sistemas expertos

Los sistemas expertos se basan en la utilización de información para la generación de la secuencia de desensamblado. La información se encuentra en una base de datos y permite, según se definen nuevos productos, utilizar la información existente para su definición, de tal manera que, si para desensamblar un determinado producto no existe una estrategia en la base de datos, se busca una que corresponda a un producto similar, y si dicha estrategia funciona correctamente entonces se aumenta la información de la base de datos para contemplar el nuevo planteamiento [202].

En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo de cómo quedaría la base de datos después de introducir varios productos en un sistema experto para planificación de secuencias de desensamblado.

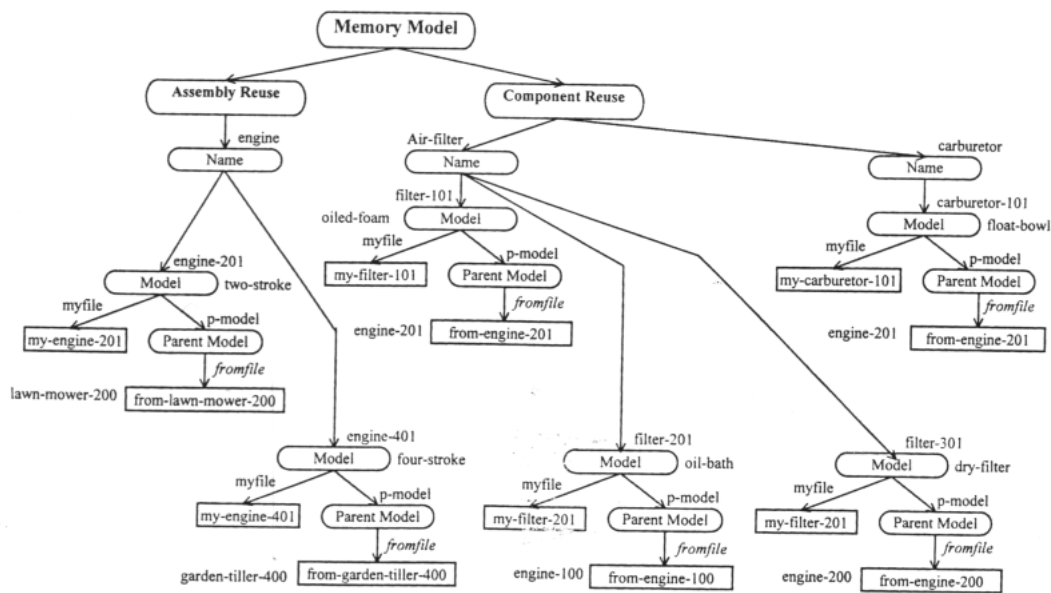


Figura 2.14: Base de datos de un sistema experto después de la introducción de varios productos (Fuente: [202]).

2.2.5.3. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos plantean una modalidad que permite de una manera interesante realizar el problema del desensamblado.

El planteamiento propuesto en [240] propone partir de un grafo and/or del producto y generar secuencias de desensamblado de manera aleatoria. A continuación se calcula el coste de cada una de ellas. El algoritmo genético crea nuevas generaciones de estrategias de desensamblado partiendo de las mejores estrategias obtenidas en la generación anterior.

Para llegar a una buena solución, el número de generaciones necesarias se incrementa rápidamente según se va aumentando la complejidad de los productos.

Otro planteamiento de los algoritmos genéticos [133] consiste en considerar cada dirección de desensamblado como un cromosoma de manera que la secuencia de movimientos a realizar sobre cada componente se calcula asignando a cada uno de los componentes del producto una dirección y se hace evolucionar al sistema hasta conseguir una secuencia que minimice el coste.

2.2.6. Comparativa

En la tabla siguiente se ha realizado una comparativa entre los métodos expuestos indicando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Método	Ventajas	Inconvenientes
Grafos de componentes-enlaces	<ul style="list-style-type: none"> Representación intuitiva. Representación sencilla de todo tipo de enlaces. 	<ul style="list-style-type: none"> Complejidad en el cálculo de la secuencia de desensamblado, se realiza previamente una simplificación del grafo.

Método	Ventajas	Inconvenientes
Grafos dirigidos	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido cálculo de la secuencia de desensamblado. • Facilidad de aplicar funciones de coste para el cálculo de la secuencia de desensamblado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un conocimiento detallado de las relaciones entre los componentes del producto.
Grafos and/or	<ul style="list-style-type: none"> • Representación intuitiva. • Expresa relaciones entre subensamblados del producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de recorrer un grafo para obtener la secuencia de desensamblado.
Características geométricas	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza modelos CAD. • Requiere poca o nula intervención de un operador. • Buen sistema para aplicar a productos de nuevo diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de casos especiales para representar restricciones de movimiento no lineales. • Aumenta la complejidad si se usan objetos no poliédricos.
Árboles	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida búsqueda de la solución. • Útiles para aplicar en sistemas de tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren gran cantidad de almacenamiento para contemplar todas las posibilidades.
Redes de Petri	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil representación partiendo del grafo and/or del producto. • Buenas para sistemas de tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad de las redes de Petri obtenidas.
Redes neuronales	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil optimización de funciones de coste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de definición de la red.
Sistemas expertos	<ul style="list-style-type: none"> • Representación modular de las tareas de desensamblado. • Permite desensamblar productos similares conociendo sólo como desensamblar uno de ellos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de información específica para conjunto de productos. • Con poca información no consiguen buenos resultados.
Algoritmos genéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen el tiempo de cómputo de las secuencias de desensamblado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren una precisa definición de cada uno de los genes. • No garantiza alcanzar una solución óptima.

2.3. Modelo relacional

En esta tesis se ha optado por realizar una nueva representación original de los productos más intuitiva y sencilla de definir que las anteriores. Esta nueva manera de representación distingue dos tipos de componentes: los elementos que forman el producto y aquellos elementos que sólo sirven para unir dos o más componentes. Además de considerar estos dos tipos de componentes se consideran tres tipos distintos de relaciones entre ellos: la primera representa que dos componentes están unidos físicamente de alguna manera, la segunda indica que tienen una relación, pero dicha relación no implica una unión directa entre ambos componentes; y el tercer tipo de relación representa la existente entre un grupo de componentes, los cuales se pueden considerar a su vez como un único componente, a la hora de desensamblar el producto, que denominaremos montaje. Cada montaje tiene asociada una serie de acciones para desensamblar un componente que pertenezca a él.

Con esta información se construye una representación jerárquica del producto que permite realizar un correcto desensamblado ya sea de un componente, de un montaje o del producto completo [268]. Esta representación es una de las aportaciones de esta tesis.

Considerando la relación jerárquica entre los componentes, la estrategia a seguir para el desensamblado se basa en recorrer dicha jerarquía desde el componente que se desea desensamblar hasta llegar al montaje que representa el producto completo, de manera que se almacenan una serie de acciones relacionadas con cada uno de los montajes, que, realizadas en sentido contrario al obtenido, indicarán las acciones a realizar, y en que orden, para desensamblar el componente seleccionado del producto.

Esta estrategia planteada se basa, en todo momento, en realizar un desensamblado no destructivo, de manera que pueda ser utilizada en tareas de mantenimiento y reciclado de componentes para su reutilización. Esto implica que todo componente del producto debe existir de manera individual y no asociado mediante uniones que impliquen una destrucción de las mismas para poder separarlo.

A continuación se describe con mayor detalle y de manera formal la representación del producto; tras ésta se exponen las acciones de desensamblado asociadas a cada tipo de montaje. Después se plantea como realizar el desensamblado total de un producto siguiendo las reglas dadas y posteriormente cómo desensamblar un componente individual y cómo desensamblar un conjunto de componentes, un montaje.

2.3.1. Definiciones y representación

En este apartado inicialmente se definen de manera formal los distintos conceptos utilizados en la planificación para dejar claro su significado de ahora en adelante. Tras estos conceptos se describe como realizar la representación gráfica de un producto así como el significado de los términos utilizados para dicha representación.

2.3.1.1. Definiciones

- **Componentes:** Se entiende por un componente a todas aquellas piezas que forman parte de un producto y poseen entidad física independiente e individual, por ejemplo: pastillas de freno, llantas, chips, etc. Es decir un componente se corresponde con cada una de las partes que se pueden considerar de manera individual en un producto (Figura 2.15).



Figura 2.15: Componentes de diversos productos.

- **Elementos de enlace:** Se entiende por un elemento de enlace a todas las piezas que tengan entidad física independiente e individual que se utilizan para enlazar dos o más componentes (Figura 2.16), por ejemplo: tornillos, conectores, etc.



Figura 2.16: Elementos de enlace.

Como puede deducirse de esta definición no se considera como elemento de enlace a soldaduras ni aquellos métodos de unión que no posean una existencia independiente e individual, por tanto si se dispone de dos piezas unidas mediante una soldadura, se consideran como un solo componente y no como dos componentes unidos mediante un elemento de enlace (la soldadura). Esto se debe, como se comentó anteriormente, a que se está trabajando con una planificación para desensamblado no destructivo y la eliminación de una soldadura implica técnicas de desensamblado destructivo. En la Figura 2.17 se muestra una placa de circuito que posee varios chips. Como los chips se encuentran soldados a la placa, no se les puede considerar como componentes individuales, ya que

están unidos mediante una soldadura; se considera como un todo a la placa con los chips.



Figura 2.17: Componentes que requieren un desensamblado destructivo.

- Elementos: Se entiende como elementos tanto a los componentes como a los elementos de enlace. Cuando aparezca este término en el texto es porque se está refiriendo indistintamente a los componentes y a los elementos de enlace. Se trata de una manera de referirse a ambos términos sin tener que utilizar los dos explícitamente y de esta manera mejorar la legibilidad del texto.
- Uniones: Se consideran uniones a las relaciones entre los distintos elementos. Se clasifican en dos tipos diferentes de uniones:
 - *De cierre*: Este tipo de uniones realizan la unión entre varios elementos formando juntos un todo. Son relaciones que permanecen mientras no se eliminen directamente. Este tipo de unión es el que existe entre un tornillo y los componentes que está atornillando. Por ejemplo el existente entre la carcasa de un ordenador y una unidad de CD (Figura 2.18).



Figura 2.18: Unión de cierre generada por un tornillo.

En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo de unión mediante rosca, la correspondiente a la tapadera de la bola de un ratón.



Figura 2.19: Unión de cierre mediante rosca.

También se puede poner como ejemplo la unión entre la tapa de las pilas de un mando a distancia y la carcasa, unidas mediante una unión a presión.

- *De contacto*: Este tipo de uniones realizan la unión entre varios componentes mientras existan uniones de cierre de un nivel jerárquico superior. En el momento en que desaparecen dichas uniones de nivel superior, también desaparece la relación entre ellos. Este tipo de unión es el que existe entre dos chapas unidas por un tornillo; las dos chapas entre sí tienen una relación, puesto que están una junto a la otra y no pueden estar independientemente, pero en el momento en que el tornillo desaparece las chapas dejan de tener relación ya que pueden tratarse individualmente sin ningún elemento propio o ajeno que las una (Figura 2.20).



Figura 2.20: Unión de contacto entre dos chapas.

- **Montaje**: Se entiende como un montaje a un conjunto de elementos combinados entre sí mediante uniones, al menos una de las cuales ha de ser una unión de cierre, de forma que configuran un todo, que puede ser considerado como un nuevo componente con un menor grado de granularidad. Un montaje es el constituido por los chips, condensadores, resistencias, etc., de un circuito impreso, que individualmente se pueden considerar como componentes; pero si se consideran en su conjunto, están unidos a la placa del circuito impreso, y se tendría un nuevo componente que sería el circuito impreso, que poseería un nivel de granularidad menor que los chips.

En la Figura 2.21 se muestra una placa de circuito impreso montada con sus componentes y junto a ella se muestran un conjunto de posibles componentes.

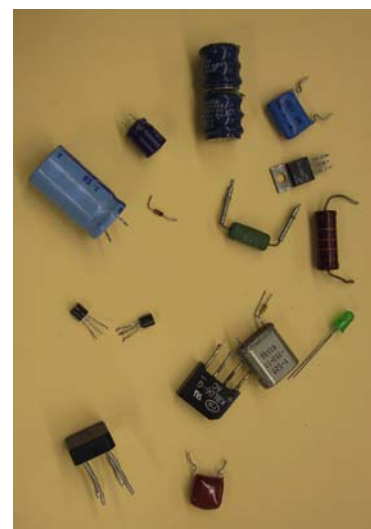
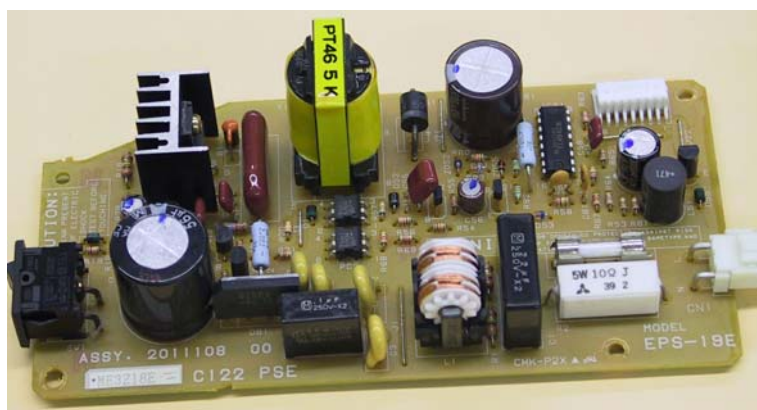


Figura 2.21: Componente con distintos niveles de granularidad.

La placa mostrada es un montaje con un nivel de granularidad menor que si se considera a los chips, condensadores y demás componentes individualmente. De esta manera se pueden definir montajes con el nivel de granularidad deseado según la aplicación a llevar a cabo; y si se dispone de modelos con mayor granularidad, se podrá trabajar sólo con el nivel deseado, considerando el montaje como si de un componente individual se tratara.

- **Producto:** Se entiende por un producto a todos los componentes y elementos de enlace que lo forman así como las relaciones entre ellos. Otra manera de entender un producto es como un montaje que posee una granularidad pequeña, un montaje que puede ser considerado como algo utilizable por ejemplo: un coche, un ordenador, el sistema de frenos de un coche, etc. Como puede apreciarse la definición de producto es relativa según la tarea que se quiera realizar, ya que un producto podrá también ser considerado como un montaje de otro producto con menor granularidad.

2.3.1.2. Representación

Los elementos definidos en el apartado anterior se representan gráficamente utilizando la nomenclatura siguiente:

- **Grafo:** Representación gráfica mediante nodos y aristas de un montaje o de un producto.
- **Nodos:** Representación gráfica de cada uno de los componentes y elementos de enlace que forman el producto. Hay dos tipos de nodos que se representan por tanto de dos maneras distintas. Los componentes mediante una circunferencia, y los elementos de enlace utilizando una circunferencia doble.
- **Arista:** Representación gráfica de las uniones. Como existen dos tipos: de cierre y de contacto, hay dos representaciones distintas. Se representan utilizando una línea continua las de cierre, y una línea discontinua las de contacto.
- **Montaje:** Se representa mediante un conjunto de nodos y aristas que deben estar unidos, al menos, por una unión de cierre. Existen dos maneras gráficas de representar un montaje; esto es debido a que una de ellas puede resultar confusa para productos con muchos montajes. La primera de las representaciones consiste en dibujar una línea cerrada que contenga los nodos y montajes que forman el montaje; ya que un montaje puede ser considerado como un componente, podrá a su vez formar parte de otro montaje. La segunda forma de representación consiste en indicar qué componentes y/o montajes pertenecen a otro montaje mediante una enumeración de los mismos, sin representación gráfica en el dibujo.

Además para definir un montaje hay que tener en cuenta las relaciones de jerarquía que se describen a continuación entre dos montajes, considerando que: un nodo que forma parte de un montaje *i*, puede formar parte de otro montaje *j*, de una de las dos maneras que se van a describir, teniendo en consideración las relaciones de precedencia existentes entre ambos, tal y como se describe a continuación:

- Si ambos montajes, i y j , puede alterar su orden de montaje (Figura 2.22a); es decir, si podemos montar primero el montaje i y a continuación el j o se puede montar primero el j y después el i , no existe precedencia entre ambos montajes; se estaría ante una relación jerárquica que implica un mismo nivel de jerarquía entre ambos montajes ya que su orden de desensamblado es indistinto.

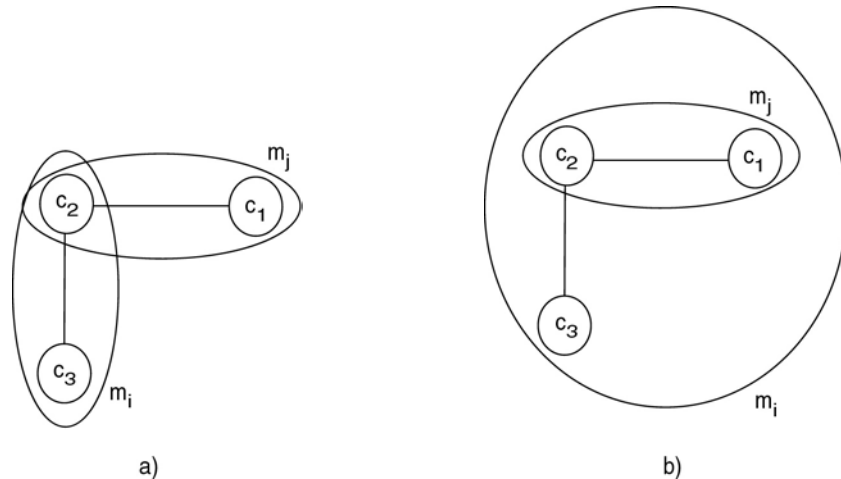


Figura 2.22: Ejemplos de montajes. a) es indistinto desensamblar primero m_i y después m_j que al revés. b) hay que desensamblar primero m_i antes de poder desensamblar m_j .

- Por otra parte si ambos montajes, i y j , no pueden alterar su orden de montaje, hay una precedencia del montaje i sobre el j . El nodo común formará parte del montaje, j , de menor precedencia; el resto de componentes del montaje i se combinarán con el montaje j considerando a este como un componente individual, de manera que todos ellos quedarán incluidos dentro del montaje i (Figura 2.22b). Por lo tanto existe una relación jerárquica entre ambos montajes, uno de ellos, el montaje i , debe ser desensamblado antes de poder acceder a desensamblar el montaje j .

2.4. Acciones de desensamblado

Como se ha dicho, para cada tipo de montaje existen una serie de acciones asociadas, según la relación existente entre los elementos que forman parte del mismo. Estas acciones forman parte del algoritmo de planificación aportado en esta tesis y se resumen en seis tipos diferentes de montajes posibles. A continuación se describen dichas acciones, explicando primero la relación existente entre los distintos elementos que forman parte de ella y seguidamente, la acción a llevar a cabo para esa situación:

1. Unión de cierre entre componentes y/o montajes (Figura 2.23). Este tipo de relación se da cuando existe una precedencia entre componentes y/o montajes, lo que implica la necesidad de eliminar primero la unión existente entre ellos y después separarlos antes de poder seguir. Las acciones a realizar son:
 - i. Eliminar la unión entre los componentes y/o montajes.

ii. Separar los componentes y/o montajes.

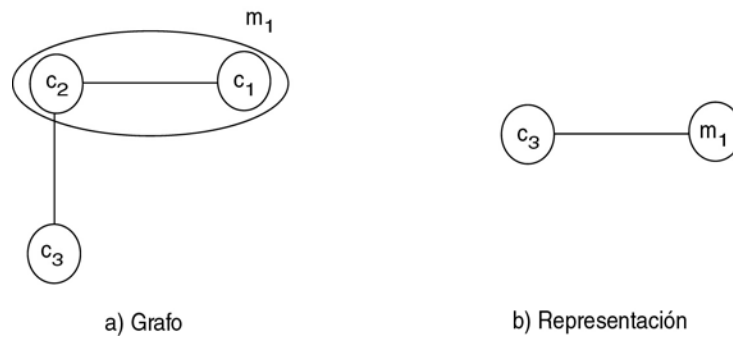


Figura 2.23: Acción 1, unión de cierre entre componente y montaje, precedencia entre montajes. a) Grafo de ejemplo con tres componentes y una estructura jerárquica entre los montajes. b) Representación compacta del grafo de este tipo de acción.

Como ejemplo de este tipo de montaje se tiene la relación existente entre una tarjeta de expansión de un ordenador y la placa base sobre la que va conectada por medio del bus de datos. Este tipo de conector entre dos componentes, que pertenece a los propios componentes, es lo que define la unión entre ellos.

En la Figura 2.24 se muestra un ejemplo de componentes que implican este tipo de acción: se ve un chip insertado en un zócalo; para desensamblar el chip del zócalo hay que utilizar una acción de tipo 1.

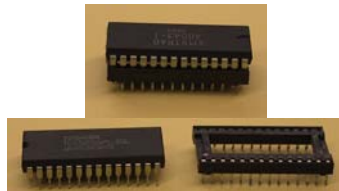


Figura 2.24: Componentes que implican una acción de tipo 1.

2. Unión de contacto entre componentes. Este tipo de relación se da cuando sólo existen uniones de contacto entre un conjunto de componentes. Respecto de este tipo de montaje hay que indicar que aunque no cumple lo dicho anteriormente, todo montaje debe tener al menos una unión de cierre. Es importante considerarlo como tal a la hora de definir las acciones de desensamblado, debido a que, esta situación aparece al eliminar la unión de cierre que unía los componentes, con lo que, considerándolos como un montaje, se simplifican las acciones asociadas a cada montaje, ya que se diferencia la acción de eliminar la unión de cierre de la eliminación de las uniones de contacto.

Pueden aparecer dos casos distintos según el número de componentes implicados:

- a. Dos componentes: Se encuentran relacionados mediante una unión de contacto sólo dos componentes (Figura 2.25), en este caso la acción a realizar es:
 - i. Separar los dos componentes.



Figura 2.25: Acción 2a, unión de contacto entre dos componentes. a) Grafo de ejemplo. b) Representación compacta del grafo de este tipo de acción.

- b. Más de dos componentes: En este caso hay más de dos componentes relacionados mediante uniones de contacto. La acción a realizar en este caso consiste en separar los componentes desde uno de los componentes accesibles hasta llegar al deseado. En el caso mostrado en la Figura 2.26 para desensamblar el componente c_i hay dos posibilidades. La primera consiste en separar los componentes c_1 de c_2 y a continuación separar los componentes c_2 de c_i con lo que ya se tendría el componentes deseado c_i desensamblado. La segunda posibilidad consiste en separar c_n de c_{n-1} y seguidamente separar c_{n-1} de c_i con lo que ya estaría desensamblado el componente c_i .

- i. Separar los componentes hasta llegar al deseado.

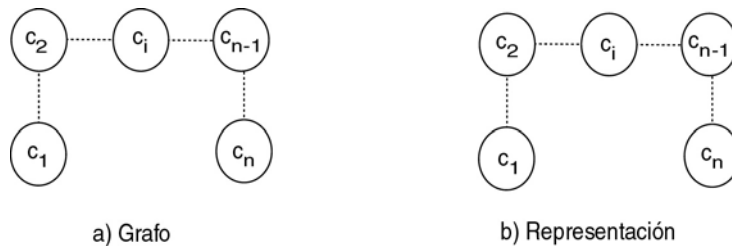


Figura 2.26: Acción 2b, unión de contacto entre más de dos componentes. a) Grafo de ejemplo. b) Representación compacta del grafo de este tipo de acción.

Un ejemplo de este tipo de montaje se tiene cuando se desmonta el auricular de un teléfono; al eliminar el tornillo que une los distintos componentes, éstos dejan de encontrarse relacionados, lo que correspondería a un montaje de este tipo. En la Figura 2.27 se muestran dos componentes de un mando a distancia que poseen este tipo de relación; juntos y por separado.

3. Montajes sin precedencia entre ellos (Figura 2.28). Este tipo de relación existe cuando es indistinto el orden para desensamblar los montajes que forman la relación, por lo tanto la acción a realizar será no hacer nada. Ya que la secuencia de desensamblado a realizar dependerá de los montajes que contengan a éste y no directamente de la relación entre ellos.

- i. No hacer nada.



Figura 2.27: Componentes que implican una acción de tipo 2. Componentes juntos y componentes separados.

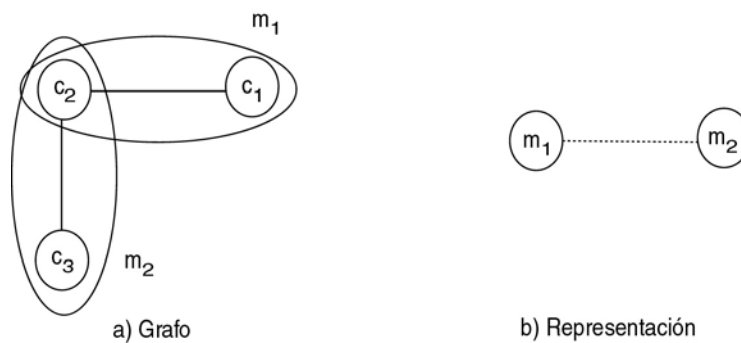


Figura 2.28: Acción 3, montajes sin precedencia entre ellos. a) Grafo de ejemplo con tres componentes y dos montajes sin precedencia. b) Representación compacta del grafo de esta acción.

Un claro ejemplo de este tipo de montajes lo tenemos cuando se tienen en una placa base de un ordenador varias tarjetas; cada tarjeta con la placa base formará un montaje independiente, y entre ellos hay un elemento común, la placa base, y además otros elementos que se pueden montar en el orden que se desee, las tarjetas, que se pueden montar primero una y luego otra, sin que el orden de conexión de las mismas con la placa base afecte al montaje final.

En la Figura 2.29 se muestra un conjunto de chips insertados en zócalos que forman parte de una tarjeta; en este caso el orden en que se desensamblen los chips no afecta al resto, luego se tiene un montaje que implica una acción de tipo 3 para el desensamblado de los chips.



Figura 2.29: Componentes que implican una acción de tipo 3.

4. Unión de cierre entre montaje y elemento de enlace. Este tipo de relación se da cuando un elemento de enlace está uniendo los componentes de un montaje (Figura 2.30). Por lo tanto la acción a realizar en este caso consiste es:

- i. Quitar el elemento de enlace.



Figura 2.30: Acción 4, unión de cierre entre montaje y elemento de enlace. a) Grafo de ejemplo con un montaje y un elemento de enlace. b) Representación compacta del grafo de este tipo de acción.

El más claro ejemplo de este tipo de montaje lo tenemos en un tornillo que está uniendo un conjunto de componentes, como sería el caso de los tornillos que, en una mando a distancia, mantienen unidas los distintos componentes entre sí (Figura 2.31).



Figura 2.31: Componentes que implican una acción de tipo 4.

5. Montaje y/o componentes unidos por un elemento de enlace (Figura 2.32). Esta relación existe cuando un elemento de enlace une varios componentes que no forman un montaje entre ellos y además no se trata de montajes cuyo orden de desensamblado sea intercambiable. En este caso las acciones a realizar son:

- i. Quitar el elemento de enlace.
- ii. Separar los montajes que estaban unidos por el elemento de enlace.

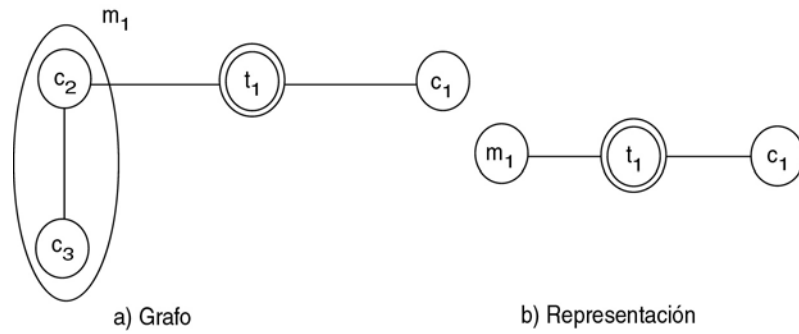


Figura 2.32: Acción 5, montajes y/o componentes unidos por un elemento de enlace. a) Grafo de ejemplo con tres componentes, un montaje y un elemento de enlace que une un componente con el montaje. b) Representación compacta del grafo de esta acción.

El ejemplo que se puede utilizar para describir este tipo de montajes lo encontramos en el caso de una televisión, en donde hay una tapa que cubre el tubo de rayos, y está unida al mismo mediante unos tornillos; los tornillos son los elementos de enlace que mantienen unidos al componente, la tapa, y el montaje, el resto del aparato de televisión. En la Figura 2.33 se muestra una placa de protección de un ordenador, unida mediante un tornillo a la carcasa, de manera que, una vez eliminado el tornillo, hay que separar la placa de la carcasa para conseguir desensamblar ambos componentes, lo que se corresponde con una acción de tipo 5.



Figura 2.33: Componentes que implican una acción de tipo 5.

6. Montajes unidos por un elemento externo cuyo orden de desensamblado es intercambiable (Figura 2.34). Este tipo de relación entre los montajes se da cuando existe un conjunto de montajes que tienen algún elemento común y es indistinto el orden en que separemos los montajes, una vez eliminado el elemento de enlace. Por lo tanto la acción que habrá que realizar es:
 - i. Quitar el elemento de enlace.

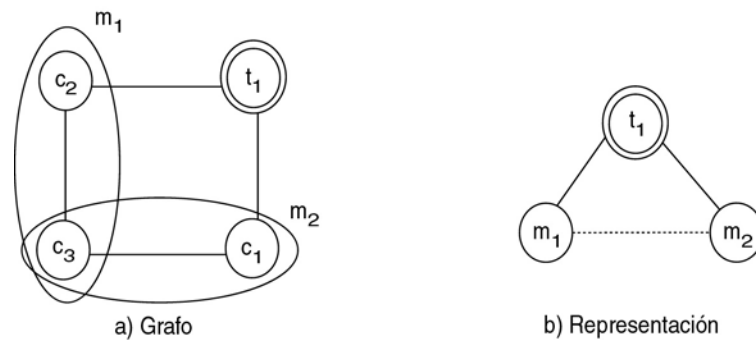


Figura 2.34: Acción 6, montajes unidos por un elemento externo cuyo orden de desensamblado es intercambiable. a) Grafo de ejemplo con tres componentes, dos montajes y un elemento de enlace que une los dos montajes. b) Representación compacta del grafo de esta acción.

Este caso se plantea claramente en los tornillos que sujetan una tarjeta a la carcasa del ordenador. Hay que eliminarlos para poder desensamblar el montaje formado por la tarjeta y la placa base, y también es necesario para poder desensamblar el montaje formado por la placa base con la carcasa; pero, una vez eliminado el tornillo, para seguir desensamblando, no nos afecta si queremos desensamblar un montaje u otro; en el momento en que el tornillo se elimina, dicha unión desaparece y quedan como dos montajes independientes a desensamblar. En la Figura 2.35 se muestra un montaje formado por una placa con los botones de "reset" y "turbo" así como otros indicadores, unidos mediante cuatro tornillos a la carcasa del ordenador. Con esta configuración se tendría entre el montaje formado por la placa y el resto del ordenador que implicaría una acción de tipo 6.



Figura 2.35: Componentes que implican una acción de tipo 6.

2.5. Estrategias de planificación

Una vez visto cómo realizar la representación de un producto y definir las acciones asociadas con él, se plantea la estrategia a seguir para conseguir desensamblar el producto. Es importante señalar que se pueden considerar dos objetivos distintos a la hora de realizar el desensamblado: Un desensamblado total del producto o un desensamblado parcial. En esta tesis se plantean aportaciones para ambos objetivos, destacando la aportación en el desensamblado parcial ya que se pueden dar dos tipos de desensamblado

parcial que son tratados en esta tesis y se considera una de sus aportaciones más importantes. En el desensamblado parcial se puede querer desensamblar directamente un componente individual o por el contrario se puede querer desensamblar un montaje; ambas estrategias son comentadas en detalle en los siguientes apartados. La principal diferencia entre desensamblar un componente o un montaje se basa en el hecho de redefinir el grafo del producto para considerar el montaje como un componente individual.

2.5.1. Desensamblado total de un producto

Para realizar el desensamblado total de un producto se parte de la representación del mismo mediante sus elementos y montajes; además se dispone de las acciones asociadas a cada montaje. De esta manera para poder desensamblar el producto, se siguen las acciones asociadas al montaje que representa el producto completo; tras estas acciones, hay que realizar aquellas asociadas a cada uno de los montajes que pertenezcan al montaje anterior, y así sucesivamente hasta tener desensamblado el producto por completo.

Por lo tanto, si se considera el producto p , compuesto por n montajes: m_1, m_2, \dots, m_n ; donde el montaje m_i tiene asociada la acción de desensamblado a_i . Además el conjunto de montajes que forman parte del montaje m_i se denomina M_i . Se tiene que la secuencia de desensamblado total se obtiene siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Se parte del montaje m_p , que se corresponde con el producto completo.
- 2) Se realiza la acción a_p asociada al montaje m_p .
- 3) $\forall m_j/m_j \in M_p$.
 - a) Realizar la acción a_j .
 - b) Si $M_j \neq \emptyset$ entonces ir al paso 3 del algoritmo considerando como montaje p el j .

2.5.2. Desensamblado parcial de un producto

A la hora de realizar el desensamblado parcial de un producto, se dan dos situaciones que requieren un tratamiento diferente. La primera se da cuando se quiere desensamblar un componente del producto, y la segunda cuando lo que se desea desensamblar es un montaje. Se ha dicho anteriormente que un montaje se considera como un componente de menor granularidad, por lo cual esta diferencia podría parecer que no existe realmente, pero la diferencia consiste en reestructurar el grafo de un producto para considerar el montaje completo como un componente individual y no como un montaje.

2.5.2.1. Desensamblado de un componente

En este apartado se van a explicar cuáles son los pasos a seguir para realizar el desensamblado de un componente individual c_i del resto de componentes del producto.

Inicialmente se parte de la representación del producto; es decir, del grafo, que representa las relaciones entre los distintos elementos, así como los montajes que forman el producto. En base a esta información se calculan

cuáles son las acciones asociadas a cada montaje del producto. Una vez se tiene esto, se procede con los siguientes pasos:

- 1) Se buscan todos aquellos montajes m_j que contienen el componente c_i .
- 2) Para cada uno de los montajes m_j almacenar la acción asociada con el montaje para separar el componente c_i del montaje m_j .
- 3) Para cada uno de los montajes m_j hay dos opciones:
 - c) Si m_j se corresponde con el montaje del producto completo: Entonces se sigue con el paso 4.
 - d) Si m_j es un montaje intermedio del producto: Entonces se considera al montaje m_j como si de un componente individual se tratara, el componente c_i a desensamblar, y se sigue con el paso 1.
- 4) Se realizan las acciones almacenadas en el paso 2 pero en sentido contrario, es decir realizando primero las acciones asociadas con el montaje del producto completo y se sigue hasta llegar a las acciones asociadas con los montajes a los que pertenece directamente el componente a desensamblar. Hay que tener en cuenta para la realización de este paso, que pueden existir un conjunto de acciones que se puedan realizar en paralelo. La información sobre si dos acciones se pueden realizar en paralelo aparece en el paso 2 del algoritmo; si existen varios montajes m_j que realizan este paso en la misma iteración del algoritmo, las acciones asociadas a dichos montajes podrán ser realizadas en paralelo.

2.5.2.2. Desensamblado de un montaje

Visto ya en el apartado anterior cómo realizar el desensamblado de un componente, en este apartado se trata cómo desensamblar un montaje en lugar de un componente. Como ya se ha comentado la principal diferencia entre el desensamblado de un componente y de un montaje, consiste en realizar la simplificación del grafo para que considere al montaje como un componente individual. En esta simplificación hay que considerar lo que sucede cuando distintos componentes de un montaje pertenecen a varios montajes a la vez y lo que se desea es desensamblar uno de esos montajes, pero no el montaje compuesto por todos ellos.

Para realizar el desensamblado del montaje m_i hay que seguir los siguientes pasos:

- 1) Cambiar todos los componentes c_j que forman parte del montaje m_i por el nuevo componente c_k , donde este nuevo componente c_k representa el montaje m_i junto en un solo componente de menor granularidad c_k . Al realizar esto, hay que cambiar también las relaciones existentes entre un componente que pertenezca a m_i y otro que no, su relación se transforma en una relación con el componente c_k . Y si lo que existe es una relación entre dos componentes internos del montaje m_i , entonces dicha relación desaparece, ya que no tiene sentido una relación c_k con c_k .

- 2) Este paso consiste en eliminar componentes redundantes, es decir, si existen dos componentes c_k que pertenecen al mismo montaje entonces se dejará sólo uno, y si un componente c_k pertenece a otro componente c_k (existencia de un montaje m_j que pertenece al montaje m_i) sólo se dejará el componente c_k que representa una menor granularidad. Así mismo todos los componentes que representan el montaje m_i se sustituyen por un único componente c_k .
- 3) Calcular las acciones asociadas a cada uno de los montajes del nuevo grafo ya que, al haber variado los elementos de los montajes y los propios montajes, estas acciones pueden ser distintas de las asignadas originalmente a cada uno de ellos.

Una vez llevados a cabo estos pasos, se dispone de un grafo que define un producto con sus correspondientes elementos y montajes, donde habrá que desensamblar el componente individual c_k para conseguir el desensamblado del montaje deseado m_i .

2.6. Ejemplo de planificación

Para ilustrar las distintas estrategias, tras realizar una descripción de los pasos a seguir se ha modelado parcialmente un ordenador (Figura 2.36).

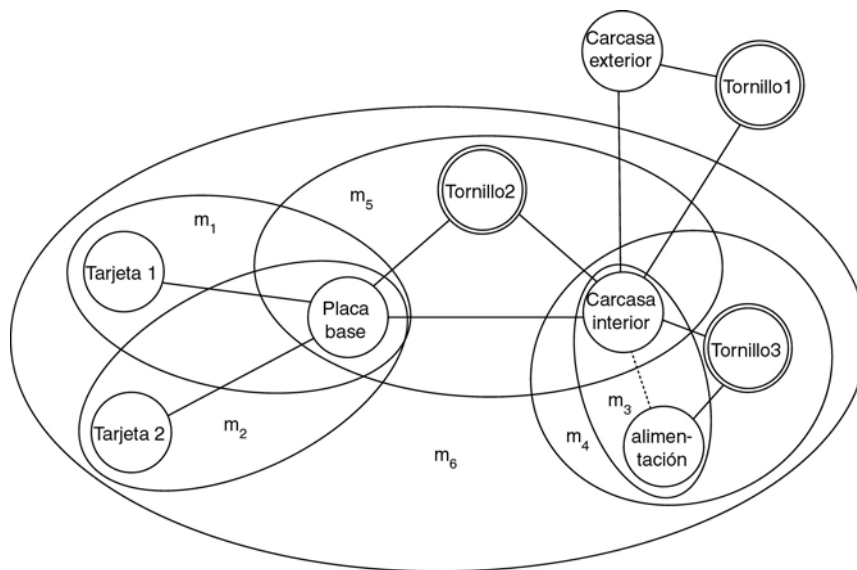


Figura 2.36: Grafo parcial de un ordenador con sus montajes.

El ordenador posee seis montajes más el producto completo, que es considerado como el montaje 7 (m_7); los montajes son los siguientes, expresados como una enumeración de los distintos componentes o montajes que incluyen:

- m_1 : Está compuesto por los componentes: "Placa base" y "tarjeta 1".
- m_2 : Está compuesto por los componentes: "Placa base" y "tarjeta 2".
- m_3 : Está compuesto por los componentes: "Carcasa exterior" y "alimentación". Este montaje, como puede verse, no posee ninguna unión de cierre; la unión de cierre está considerada en el montaje

m_4 . El considerar estos componentes como un montaje, tal como se dijo en el apartado anterior, se debe a que, una vez eliminada la unión que mantiene unidos los componentes, en el montaje m_4 se generan las acciones que se contemplan en el montaje m_3 . Al considerarlo de esta manera, permite separar las acciones en dos montajes, en lugar de tener que definir las todas en un único montaje.

- m_4 : Está compuesto por el montaje: m_3 ; y por el elemento de enlace: "tornillo 3".
- m_5 : Está compuesto por los componentes: "Placa base" y "carcasa interior"; y por el elemento de enlace: "tornillo 2".
- m_6 : Está compuesto por los montajes: m_1 , m_2 , m_4 y m_5 .
- m_7 : Está compuesto por el componente: "Carcasa exterior"; el elemento de enlace: "tornillo 1"; y el montaje m_6 .

2.6.1. Desensamblado total de un producto

Teniendo en cuenta el producto definido anteriormente en la Figura 2.36 las acciones asociadas a cada uno de los montajes son las siguientes:

- 1) m_1 : Es un montaje de tipo 1, ya que está formado por dos componentes relacionados directamente entre sí; luego las acciones asociadas con este montaje son:
 - Eliminar la unión entre los dos componentes, en este caso la unión es el bus de datos.
 - Separar los componentes. Dado que si eliminamos la unión, separación por el bus de datos, ya se tienen separados. La acción de eliminar la unión, permite tener directamente separados los dos componentes.
- 2) m_2 : Este montaje también es de tipo 1, ya que está formado por elementos similares que el montaje 1. Luego las acciones relacionadas con este montaje son equivalentes:
 - Eliminar la unión entre los componentes.
 - Separar los componentes.
- 3) m_3 : En este caso el montaje es del tipo 2, para ser más exactos, es un montaje de tipo 2a, dado que la carcasa interior y la fuente de alimentación se encuentran unidas, la una a la otra, mediante una relación de contacto. Con lo que en este caso la acción asociada es:
 - Separar los dos componentes.
- 4) m_4 : Este montaje es de tipo 4, ya que el elemento de enlace "tornillo 3" mantiene unidos a los elementos del montaje m_3 . Con lo que la acción asociada con este montaje es:
 - Quitar el elemento de enlace ("tornillo 3").
- 5) m_5 : Este montaje se corresponde con un montaje de tipo 5, es decir dos componentes unidos mediante un elemento de enlace. Por ello las acciones asociadas con este montaje son:

- Quitar el elemento de enlace ("tornillo 2").
 - Separar los componentes que estaban unidos por el elemento de enlace ("placa base" y "carcasa interior").
- 6) m_6 : Este montaje es de tipo 3, dado que los distintos montajes se pueden ensamblar en cualquier orden. Con lo que la acción asociada a este montaje es:
- No hacer nada.
- 7) m_7 : Este montaje es de tipo 5, lo que quiere decir un montaje (m_6) y un componente ("carcasa exterior") unidos mediante un elemento de enlace ("tornillo 1"). Lo que implica las siguientes acciones:
- Quitar el elemento de enlace ("tornillo 1"):
 - Separar el componente ("carcasa exterior") del montaje (m_6).

Utilizando estas acciones y las normas para la definición de la secuencia de desensamblado total del producto (Apartado 2.5.1), ésta queda de la siguiente manera:

- 1) Como que el montaje m_7 representa al producto hay que:
 - a. Quitar el elemento de enlace "tornillo 1".
 - b. Separar el componente "carcasa exterior" del montaje m_6 .
 - c. Seguir las acciones de desensamblado para el montaje m_6 .
- 2) Las acciones asociadas con el montaje m_6 son:
 - a. No hacer nada.
 - b. Como los montajes m_1 , m_2 , m_4 y m_5 pertenecen al montaje m_6 hay que seguir con las acciones asociadas con estos montajes, que además algunas de ellas podrán ser realizadas en paralelo: aquellas que no impliquen el desensamblado del mismo componente.
- 3) Las acciones asociadas con m_5 son:
 - a. Quitar el elemento de enlace "tornillo 2".
 - b. Separar los componentes "placa base" y "carcasa interior".
- 4) Las acciones asociadas con m_4 son:
 - a. Quitar el elemento de enlace "tornillo 3".
 - b. Como m_3 pertenece al montaje m_4 , se sigue con las acciones para desensamblar dicho montaje.
- 5) La acción asociada con m_3 es:
 - a. Separar los componentes "carcasa interior" de "alimentación".
- 6) Las acciones asociadas con el montaje m_2 son:
 - a. Eliminar la unión entre los componentes "placa base" y "tarjeta 2".
 - b. Separar los dos componentes.
- 7) Las acciones asociadas con el montaje m_1 son:

- a. Eliminar la unión entre los componentes "placa base" y "tarjeta 1".
- b. Separar los dos componentes.

Esta serie de acciones se pueden expresar en forma de grafo dirigido de tareas a realizar, que expresa la precedencia y el paralelismo posible entre las acciones de desensamblado (Figura 2.37).

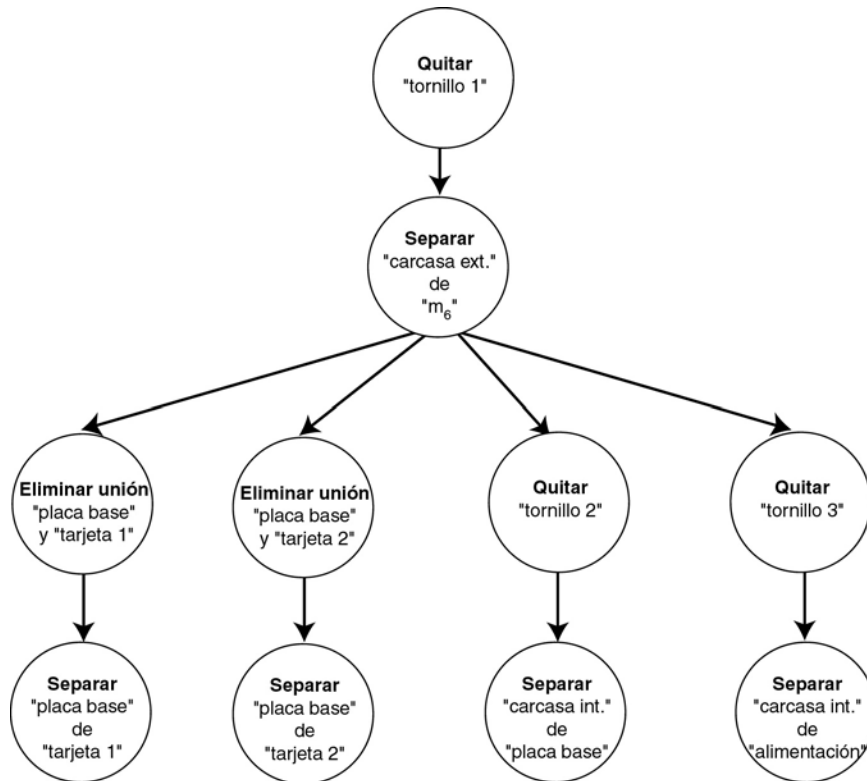


Figura 2.37: Grafo dirigido con las acciones a realizar para desensamblar totalmente el ordenador de la Figura 2.36.

De esta manera, y siguiendo las acciones indicadas se lograría el desensamblado total del producto.

2.6.2. Desensamblado parcial de un producto

El desensamblado parcial de un producto se puede realizar, tal y como se dijo anteriormente, desde dos perspectivas distintas: el desensamblado de un único componente o el desensamblado de un montaje. Visto en el apartado 2.5.2 la descripción teórica del algoritmo a utilizar para generar las correspondientes secuencias de desensamblado, en este apartado se van a ilustrar dichos algoritmos basándose en el desensamblado parcial de un ordenador, primero se desensambla un componente y posteriormente se ilustra para el desensamblado de un montaje.

2.6.2.1. Desensamblado de un componente

Como ejemplo del desensamblado de un determinado componente se va a desensamblar el componente "tarjeta 1" del ordenador de la Figura 2.36. Para llevarlo a cabo, primeramente hay que conocer las acciones asociadas a cada montaje, que en este caso, como es el mismo grafo, son las expuestas

en el apartado anterior para el desensamblado total del producto. Seguidamente se siguen los pasos indicados para el desensamblado de un componente:

- 1) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "tarjeta 1".
 - Este componente pertenece solamente al montaje m_1 .
- 2) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con el montaje encontrado en el paso 1, es decir las acciones asociadas con el montaje m_1 .
 - Eliminar la unión entre los componentes "placa base" y "tarjeta 1".
 - Separar los componentes "placa base" y "tarjeta 1".
- 3) Paso 3 del algoritmo: Como el montaje m_1 no es el producto completo se sigue con el paso 1 del algoritmo, considerando como componente a desensamblar el montaje m_1 .
- 4) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje m_1 ".
 - El montaje m_1 pertenece al montaje m_6 .
- 5) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con el montaje encontrado en el paso anterior, las acciones asociadas con el montaje m_6 .
 - No hacer nada.
- 6) Paso 3 del algoritmo: Como el montaje m_6 no es el producto completo, entonces se sigue con el paso 1 del algoritmo, considerando como componente a desensamblar el montaje m_6 .
- 7) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje m_6 ".
 - El montaje m_6 pertenece sólo al montaje m_7 .
- 8) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con el montaje encontrado en el paso anterior del algoritmo, es decir las acciones asociadas con el montaje m_7 .
 - Quitar elemento de unión "tornillo 1".
 - Separar el componente "carcasa exterior" del montaje " m_6 ".
- 9) Paso 3 del algoritmo: Como el montaje m_7 sí que se corresponde con el producto completo entonces se sigue con el paso 4 del algoritmo.
- 10) Paso 4 del algoritmo: Realizar las acciones almacenadas en los sucesivos "pasos 2" del algoritmo, en sentido contrario, para llevar a cabo el desensamblado. Es decir las acciones a seguir para desensamblar el componente "tarjeta 1" son:
 - Quitar elemento de unión "tornillo 1".
 - Separar el componente "carcasa exterior" del montaje " m_6 ".
 - No hacer nada.

- Eliminar la unión entre los componentes "placa base" y "tarjeta 1".
- Separar los componentes "placa base" y "tarjeta 1".

Estas acciones se pueden expresar en forma de grafo dirigido, como se ve en la Figura 2.38, donde se ha eliminado la acción de "no hacer nada" ya que no aporta información útil a la hora de realizar el desensamblado, pues consiste en no hacer nada, es decir, pasar a la siguiente acción.

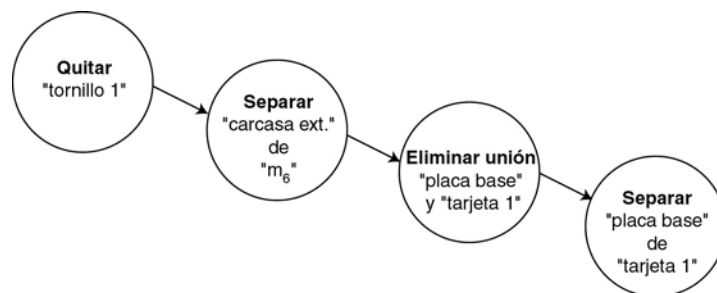


Figura 2.38: Grafo dirigido con las acciones a realizar para desensamblar el componente "tarjeta 1" del ordenador de la Figura 2.36.

2.6.2.2. Desensamblado de un montaje

Para ilustrar más claramente cómo se lleva a cabo el desensamblado de un montaje, se va a realizar el desensamblado del montaje m_1 del producto de la Figura 2.36. Para ello se siguen los siguientes pasos:

- 1) Cambiar todos los componentes que pertenezcan al montaje m_1 (en este caso los componentes "tarjeta 1" y "placa base") por un nuevo componente, que denominaré montaje₁. Realizando esta sustitución, el grafo del producto queda como se puede ver en la Figura 2.39.

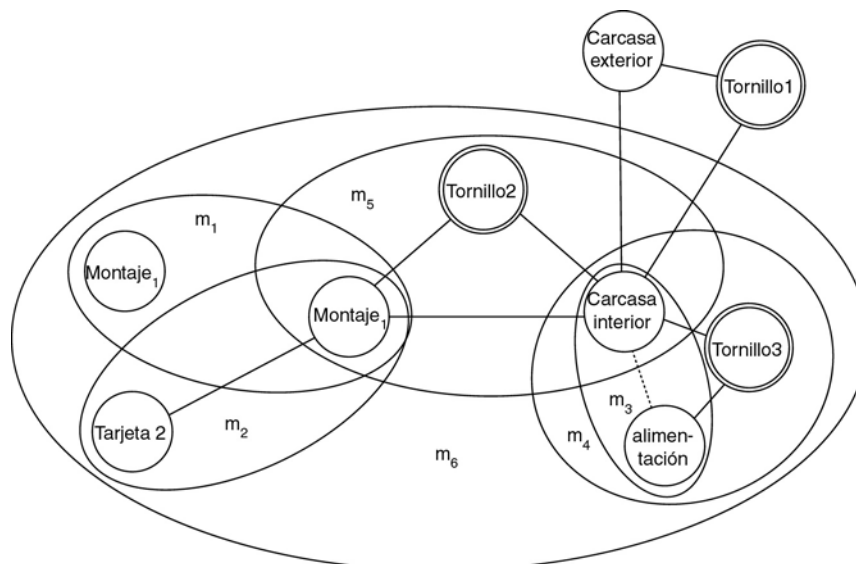


Figura 2.39: Grafo del producto para desensamblar el montaje m_1 . Primer paso del algoritmo.

- 2) Eliminar los componentes redundantes y simplificar el montaje m_1 . Para ello se transforma el montaje m_1 en un único componente denominado "montaje₁", que mantenga las relaciones existentes

entre los distintos componentes "montaje₁" que pertenecen a él y los componentes que no pertenecen al montaje. El grafo del producto, tras esta simplificación, se muestra en la Figura 2.40.

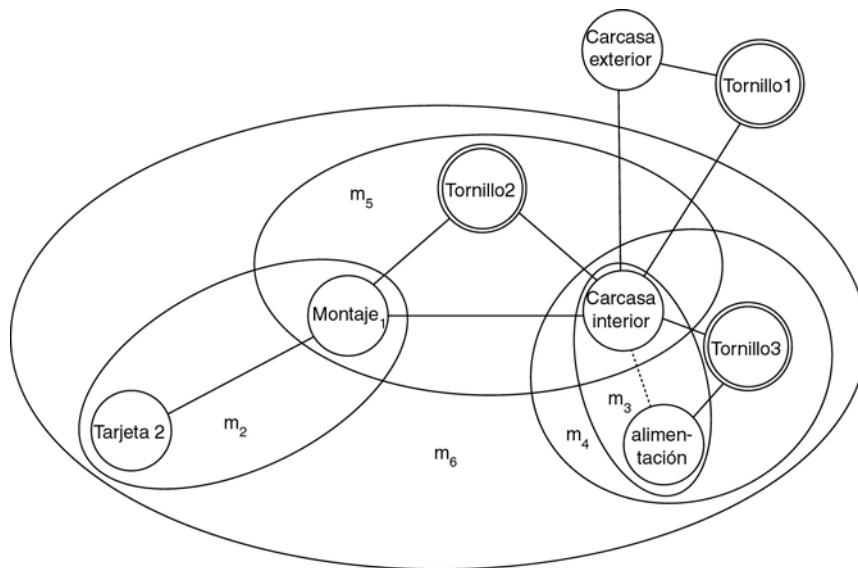


Figura 2.40: Grafo del producto para desensamblar el montaje m_1 . Segundo paso del algoritmo. El grafo definitivo del producto considerando como componente "montaje₁" al montaje m_1 .

- 3) Calcular las nuevas acciones asociadas a cada uno de los montajes teniendo en cuenta el nuevo grafo, el grafo de la Figura 2.40. Las acciones quedan de la siguiente manera:
- m_2 : Este montaje es de tipo 1, porque esta formado por dos componentes relacionados directamente entre sí, el componente "tarjeta 2" y el componente "montaje₁". Luego las acciones relacionadas con este montaje son:
 1. Eliminar la unión entre los componentes.
 2. Separar los componentes.
 - m_3 : Este montaje es de tipo 2, debido a que la carcasa interior y la fuente de alimentación se encuentran unidas la una a la otra mediante una relación de contacto. Con lo que en este caso la acción asociada es:
 1. Separar los dos componentes.
 - m_4 : Este montaje es de tipo 4, ya que el elemento de enlace "tornillo 3" mantiene unidos a los elementos del montaje m_3 . Con lo que la acción asociada con este montaje es:
 1. Quitar el elemento de enlace ("tornillo 3").
 - m_5 : Este montaje se corresponde con un montaje de tipo 5, es decir dos componentes unidos mediante un elemento de enlace. Por ello las acciones asociadas con este montajes son:
 1. Quitar el elemento de enlace ("tornillo 2").

2. Separar los componentes que estaban unidos por el elemento de enlace ("montaje₁" y "carcasa interior").
 - m₆: Este montaje es de tipo 3, debido a que los distintos montajes se pueden ensamblar en cualquier orden. Con lo que la acción asociada a este montaje es:
 1. No hacer nada.
 - m₇: Este montaje corresponde al producto completo, y es de tipo 5, lo que quiere decir un montaje (m₆) y un componente ("carcasa exterior") unidos mediante un elemento de enlace ("tornillo 1"). Lo que implica las siguientes acciones:
 1. Quitar el elemento de enlace ("tornillo 1"):
 2. Separar el componente ("carcasa exterior") del montaje (m₆).

Con esto, ya se tienen preparado el grafo del producto para realizar el desensamblado del montaje m₁; a continuación hay que seguir los pasos correspondientes al desensamblado de un componente individual (componente "montaje₁") para calcular la secuencia de desensamblado. Ésta se calcula de la siguiente manera:

- 1) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje₁".
 - Este componente pertenece al montaje m₂ y m₅.
- 2) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con los montajes encontrados en el paso 1, es decir las acciones asociadas con el montaje m₂:
 - Eliminar la unión entre los componentes.
 - Separar los componentes ("tarjeta 2" y "montaje₁").
 Y las acciones asociadas con el montaje m₅ son:
 - Quitar el elemento de enlace ("tornillo 2").
 - Separar los componentes que estaban unidos por el elemento de enlace ("montaje₁" y "carcasa interior").
- 3) Paso 3 del algoritmo: Como el montaje m₂ no es el producto completo, se sigue con el paso 1 del algoritmo, considerando como componente a desensamblar el montaje m₂. Y como m₅ tampoco es el producto completo, hay que realizar lo mismo que para m₂: seguir con el paso 1 del algoritmo. Para simplificar primero se desarrollan los pasos correspondientes al montaje m₂ y después se continúa con los del montaje m₅.
- 4) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje m₂".
 - El montaje m₂ pertenece al montaje m₆.
- 5) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con el montaje encontrado en el paso anterior, las acciones asociadas con el montaje m₆.

- No hacer nada.
- 6) Paso 3 del algoritmo: Debido a que el montaje m_6 no es el producto completo entonces se sigue con el paso 1 del algoritmo, considerando como componente a desensamblar el montaje m_6 .
 - 7) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje m_6 ".
 - El montaje m_6 pertenece sólo al montaje m_7 .
 - 8) Paso 2 del algoritmo: Almacenar las acciones asociadas con el montaje encontrado en el paso anterior del algoritmo, es decir las acciones asociadas con el montaje m_7 .
 - Quitar elemento de unión "tornillo 1".
 - Separar el componente "carcasa exterior" del montaje " m_6 ".
 - 9) Paso 3 del algoritmo: Como el montaje m_7 sí que se corresponde con el producto completo, entonces se sigue con el paso 4 del algoritmo.
 - 10) Antes de continuar con el paso 4 del algoritmo, hay que seguir la secuencia de desensamblado que se había dejado a medias en el punto 3 de este desarrollo: la secuencia para desensamblar m_5 , ya que hasta ahora, se había calculado la de m_2 , olvidándonos de la de m_5 .
 - 11) Paso 1 del algoritmo: Buscar los montajes a los que pertenece el componente "montaje m_5 ".
 - El montaje m_5 pertenece al montaje m_6 .
 - 12) Debido a que el montaje m_5 pertenece al montaje m_6 se dan las mismas acciones de desensamblado para este montaje m_6 descritas anteriormente desde el punto 5 hasta el punto 9, con lo que ya se puede seguir con el último paso del algoritmo:
 - 13) Paso 4 del algoritmo: Realizar las acciones almacenadas en los sucesivos "pasos 2" del algoritmo, en sentido contrario, para llevar a cabo el desensamblado. Es decir las acciones a seguir para desensamblar el componente "montaje₁" son:
 - Quitar elemento de unión "tornillo 1".
 - Separar el componente "carcasa exterior" del montaje " m_6 ".
 - No hacer nada.
 - Quitar el elemento de enlace ("tornillo 2").
 - Separar los componentes que estaban unidos por el elemento de enlace ("montaje₁" y "carcasa interior").
 - Eliminar la unión entre los componentes.
 - Separar los componentes ("tarjeta 2" y "montaje₁").

Estas acciones se pueden expresar en forma de grafo dirigido tal como se ve en la Figura 2.41, donde se ha eliminado la acción de "no hacer nada".

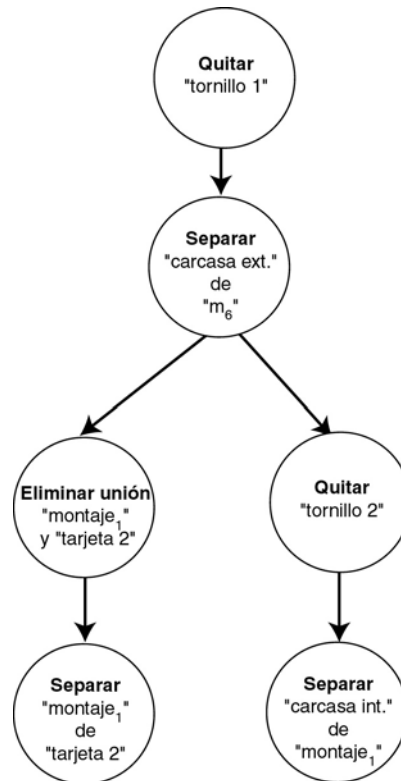


Figura 2.41: Grafo dirigido con las acciones a realizar para desensamblar el montaje m_1 ("montaje1") del ordenador de la Figura 2.36.

2.7. Evaluación del algoritmo

En este apartado se contemplan las distintas posibilidades del algoritmo, teniendo en cuenta cuando es posible obtener una solución y cuando no.

El algoritmo planteado presenta solución siempre que el grafo de tareas este definido conforme a las reglas definidas anteriormente, es decir:

Todo montaje m_i , perteneciente al producto p , tiene una acción asociada a_i , que permite separar los componentes que lo forman.

Por lo tanto para todo montaje del producto se puede definir una secuencia de montajes, desde el que se desea desensamblar, hasta el montaje que representa el producto p . Si se tiene en consideración la premisa anterior, dicha secuencia tiene asociadas una serie de acciones que permite separar los componentes implicados en los montajes, y por tanto realizar la operación de desensamblado deseado.

Para demostrarlo se parte de que para que no se cumpla lo anterior hay dos opciones:

- El montaje m_k , perteneciente a la secuencia de desensamblado, no tiene asociada una acción de desensamblado.
- El montaje m_k , perteneciente a la secuencia de desensamblado, tiene asociada una acción que no permite separar los componentes que lo forman.

Como puede observarse claramente, la primera condición no se puede dar ya que ello implicaría que el producto no se ha definido conforme a las reglas correspondientes, por lo que no existiría una acción asociada al montaje m_k .

La segunda condición tampoco puede darse debido a que por definición todo montaje tiene asociada una acción de desensamblado que permite separar todos los componentes que lo forman.

Con lo que se llega a la conclusión que siempre que se pueda definir el producto utilizando las reglas dadas se puede calcular la secuencia de desensamblado del mismo.

Por otra parte, el coste del algoritmo viene definido por el número de montajes que forman el producto, ya que en el peor de los casos hay que desensamblar todos los montajes para llegar al componente objetivo, lo que implica una acción por cada uno de ellos.