

## **2. Revisión de la literatura.**

### ***2.1. Contexto de los sistemas de fabricación.***

Un sistema de fabricación transforma materias primas en productos finales, con el fin de obtener beneficios. Cuando hablamos de beneficios, no sólo hay que tener en cuenta los beneficios económicos obtenidos directamente por la venta de los productos; también entran en juego otros aspectos, como adquirir una buena reputación u obtener una cuota de mercado, que a largo plazo beneficiarán a la empresa (Bi *et al.*, 2008).

Las características de un sistema de fabricación están muy vinculadas al momento en el que son diseñados. Ello se debe, en primer lugar, al grado de desarrollo tecnológico en que se encuentra la industria en ese momento. Pero, aludiendo a su definición, es de vital importancia obtener beneficios, y para ello deben tenerse en cuenta las necesidades de los usuarios de sus productos. Estas necesidades plantearán unos requisitos que han de cumplir los sistemas de fabricación para ser competitivos. El hecho de que los requisitos que debe satisfacer un sistema de fabricación vayan cambiando con el paso de los años, conllevará que éste deba cambiar para adaptarse a la situación actual.

Para describir la evolución de los sistemas de fabricación es imprescindible recurrir al concepto de paradigma. Este término fue acuñado por Thomas Kuhn en los años 60 del siglo pasado para describir un conjunto de prácticas que definen una disciplina científica durante un período de tiempo. Así, un paradigma ofrece una solución a un problema, válida durante un período de tiempo, dando paso a otro paradigma cuando cambien las circunstancias.

Para mostrar de una forma más concreta el concepto de paradigma, e introducir el contexto en el que se encuentran inmersos los sistemas de fabricación en la actualidad, comenzaremos describiendo brevemente la evolución de los sistemas de fabricación y los cambios en las necesidades que se les planteaban a lo largo del siglo pasado. Después, nos centraremos en las necesidades que se plantean al mercado en la actualidad, y de una serie de estrategias generales que, llevándose a la práctica, conforman una serie de paradigmas.

### **2.1.1. Evolución de los paradigmas de fabricación.**

En la literatura, existen diferentes formas de clasificar los períodos que pueden distinguirse en el desarrollo de los sistemas de fabricación. En términos de técnicas de fabricación, optaremos por la clasificación propuesta en (Mehrabi *et al.*, 2000), que distingue tres épocas.

#### ***2.1.1.1. Época previa a las máquinas de control numérico (antes de 1970).***

A comienzos del siglo pasado, se produjo un hecho de trascendental importancia en la historia de la fabricación: la compañía Ford introdujo cadenas de montaje, también denominadas líneas de ensamblaje, en los sistemas productivos de sus fábricas. Esta forma de organizar el trabajo no fue propiamente un invento de esta compañía: fue una técnica que fue evolucionando a lo largo de los años, gracias a diversas aportaciones individuales, que acabaron desembocando en su implantación, y posterior difusión por parte de Ford. La reducción de costes que produjo la implantación de estos sistemas de fabricación, permitió que los productos tuviesen un precio más asequible, con lo que podían ser consumidos por un mayor número de personas. Mediante esto, Ford sentó las bases del paradigma de fabricación que marcó gran parte del siglo XX: la producción en masa.

Inicialmente, las cadenas de montaje eran manuales, ya que consistían en una secuencia de estaciones de trabajo, en las que estaban dispuestos trabajadores, cada uno especializado en una etapa del proceso productivo (Groover, 2001). Éstos siempre realizaban la misma tarea, consistente en el ensamblado de piezas, desembocando en un mismo producto final. El transporte del producto a través de las estaciones de trabajo era realizado, bien de forma manual, bien mediante un sistema mecanizado. Un ejemplo genérico de este tipo de cadena puede verse en la Figura 1.

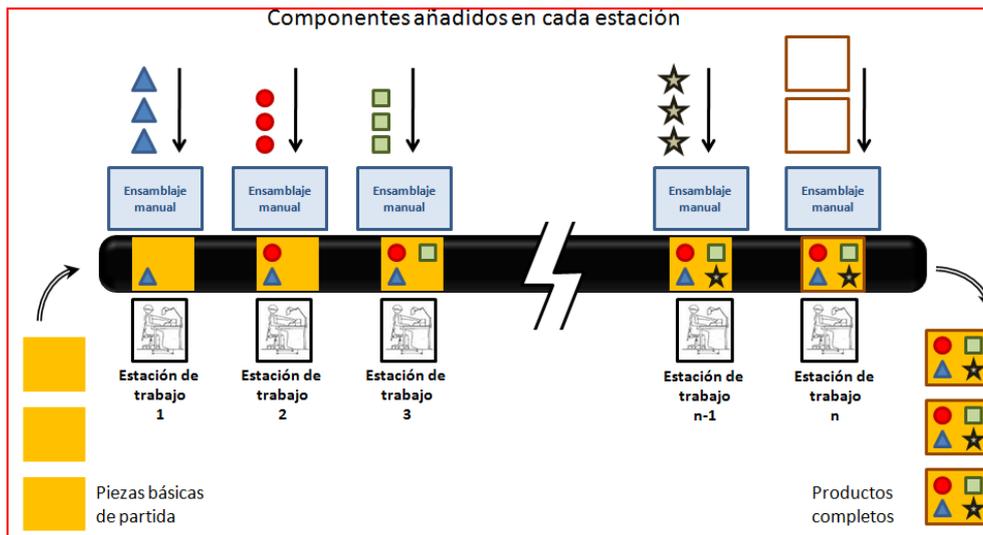


Figura 1: Configuración genérica de una cadena de montaje manual.

Posteriormente, las cadenas de montaje fueron evolucionando, de forma que las estaciones de trabajo pasaron a ser principalmente automáticas, siendo complementadas por trabajadores sólo en el caso de que se trataran de actividades muy difíciles de automatizar, o bien, fuese necesaria una inspección para comprobar el estado del proceso productivo. Este tipo de cadenas de montaje se denominaron *líneas transfer*, y puede observarse un ejemplo de una de ellas en la Figura 2. Por el hecho de que estos sistemas, mediante la operación simultánea de varias herramientas, se dedicasen a la fabricación de grandes volúmenes de un único producto a bajo coste y con la calidad requerida, son denominados Sistemas de Fabricación Dedicados (SFD).

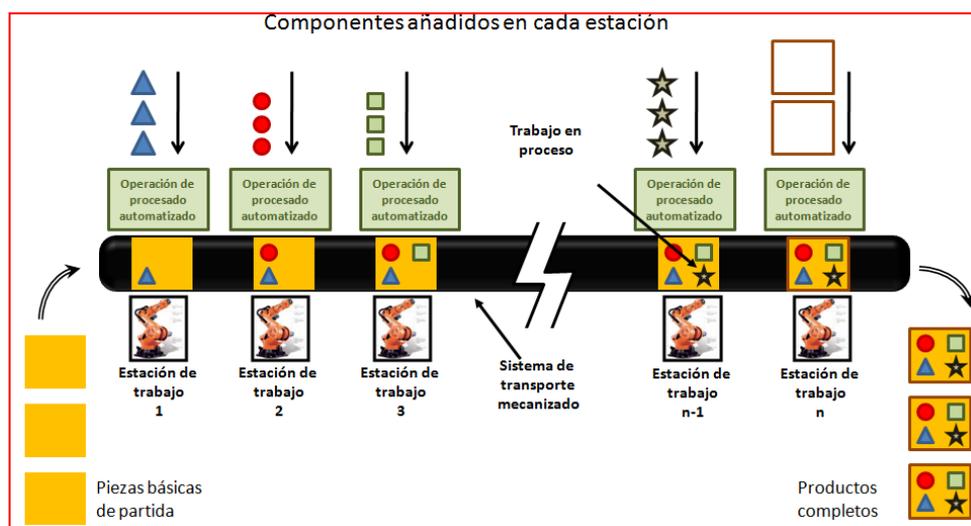


Figura 2: Configuración genérica de una cadena de montaje automatizada.

En esta época la competencia era local, y no existía demanda de variantes de productos, con lo que los períodos de vida de éstos eran largos. Además, existía una gran falta de integración en los sistemas de producción.

Estos sistemas de producción son de gran utilidad en momentos en los que la demanda de productos únicos es alta, como fue en el caso de los años que prosiguieron a las guerras mundiales. Cuando se da tal situación, el coste por componente es relativamente bajo, por lo que un SFD es efectivo cuando la demanda supera a la oferta y se puede trabajar a pleno rendimiento. Pero existen casos en los que una cadena de producción no puede trabajar a pleno rendimiento. Esto puede deberse a que el producto se encuentre en su fase de inicio o decadencia, o bien, que se encuentre en su fase de madurez, pero no se alcancen los volúmenes de producción previstos cuando se diseñó el SFD. También puede ocurrir que la demanda de un producto se incremente de forma rápida, de manera que el sistema de producción no pueda conseguir esta oportunidad de vender más productos debido a que es incapaz de superar la capacidad máxima de la cadena.

#### ***2.1.1.2. Época de máquinas de control numérico (1970-1990).***

Con el paso de los años, las piezas o productos a fabricar se hicieron más complejos, con lo que eran necesarias operaciones cada vez más precisas. Debido a esto, la necesidad de conseguir alta calidad a coste reducido se convirtió en el nuevo objetivo de las empresas. La invención de las máquinas de control numérico (CNC) y su subsiguiente evolución, marcó de forma dramática la evolución de los sistemas de fabricación.

La implantación de estas máquinas en los sistemas productivos permitió una gran mejora en la calidad y la precisión, acompañadas de un control de la maquinaria, software y hardware, más preciso y una integración más fácil. Distintas técnicas fueron introducidas en este período, entre ellas Lean Manufacturing y los Sistemas de Fabricación Flexible (SFF).

El término Lean Manufacturing fue acuñado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachussetts a finales de los 80 para describir un conjunto de mejoras que la compañía Toyota introdujo en sus sistemas de producción para sobrevivir en el mercado japonés de la automoción tras la 2ª Guerra Mundial. No constituía un paradigma de fabricación por sí mismo, sino una mejora en la eficiencia de la producción en masa mediante la que se pretendía reducir el gasto,

los costes y mejorar la calidad del producto de los sistemas de fabricación existentes, maximizando así los beneficios obtenidos.

Sin embargo, dadas las carencias que sufren los SFD cuando las demandas no son lo suficientemente grandes, resultó necesaria la introducción de un nuevo paradigma de fabricación. Un intento de superar estas debilidades fueron los Sistemas de Fabricación Flexible (SFF), capaces de fabricar diferentes cantidades de una variedad de productos en el mismo sistema productivo. Éstos están compuestos fundamentalmente, por las ya mencionadas máquinas CNC (ver Figura 3) y alguna que otra maquinaria programable. Tienen un hardware fijo y un software fijo, aunque programable para manejar los cambios en las órdenes de trabajo, secuencias de producción, programas de las distintas piezas y utillaje para los distintos tipos de piezas.



**Figura 3: Máquina CNC.**

A diferencia de los SFD, el objetivo de los SFF es la fabricación económica de pequeñas cantidades de diferentes productos, que podrán cambiar con el tiempo, con un coste de cambio pequeño, en el mismo sistema y con una calidad requerida. Para cumplir este objetivo, es introducido el concepto de familia de productos, definida como el conjunto formado por uno, o varios productos, con similares dimensiones, características geométricas, tolerancias, tales que pueden ser producidos en el mismo, o similar, sistema productivo (Mehrabi *et al.*, 2000).

Un inconveniente significativo que presentan estos sistemas de fabricación es su elevado coste. Esto se debe a que las máquinas CNC son de propósito general, es decir, no están diseñadas para fabricar de forma específica una determinada pieza. Los SFF se construyen con todas las funcionalidades y flexibilidad posibles, incluso con aquellas que no son necesarias en el momento de su instalación. La lógica que existe detrás de esto es “instalar en caso de que más adelante se pueda necesitar”, lo que provoca que una gran parte de la inversión realizada quede inutilizada. Otras razones son que usan un software inadecuado, ya que el desarrollo de un software específico para cada usuario sería extremadamente costoso. Además, están sujetos a quedar obsoletos, pues la

presencia de hardware y software fijos imposibilita la incorporación de avances de la tecnología. Los continuos avances en informática, control, óptica, motores de alta velocidad, materiales, etc., hacen que el sistema de fabricación más eficiente deje de serlo en poco tiempo.

El número de piezas terminadas en un SFF es menor que en un SFD, debido a que las máquinas CNC no permiten la operación simultánea de dos o más herramientas. La combinación de equipos de coste elevado y bajo número de piezas terminadas hace que el coste individual de cada pieza fabricada sea relativamente elevado. Por tanto, la capacidad productiva de un SFF es normalmente inferior a la de un SFD, siendo su coste inicial muy superior. Por ello, estos sistemas de producción no han tenido mucha aceptación en la industria.

#### ***2.1.1.3. Época del conocimiento (posterior a 1990).***

La situación actual de los mercados es bastante impredecible, debido a la implantación de una economía globalizada, en la que existe un alto nivel de competitividad (Koren *et al.*, 1999). Además, está sujeta a cambios de diversa naturaleza, relacionados con los productos demandados y su volumen, nuevas regulaciones por parte de los gobiernos y constantes innovaciones tecnológicas. Se ha experimentado un gran progreso en diversas áreas, como los sistemas de tratamiento de información, el desarrollo de programas de aplicación para varios propósitos, grandes avances en sistemas de comunicaciones, y la informática se ha implantado en la mayoría de campos. Por lo tanto, la competencia global y las tecnologías de información son los factores que se encuentran detrás de los recientes cambios en los sistemas de fabricación. Todo esto, unido al cambio de perfil del consumidor actual, inquieto y con grandes ansias de individualidad, fuerza a las empresas a adaptarse con rapidez a los cambios del mercado. En la Figura 4 podemos ver esquematizados los cambios en los objetivos económicos de los distintos paradigmas que hemos destacado.

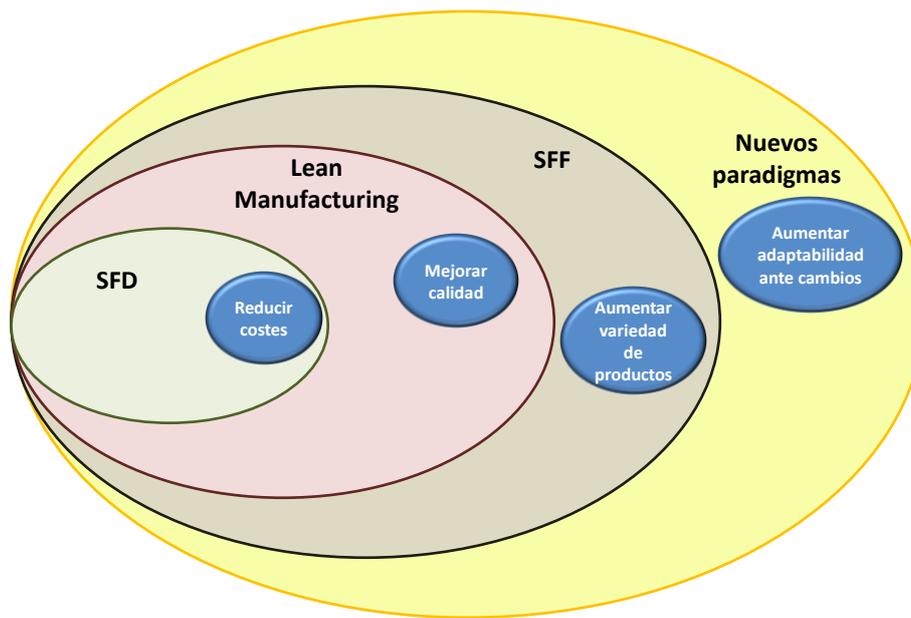


Figura 4: Objetivos económicos de varios paradigmas de fabricación.

Hemos llegado a un punto de la Historia que se presenta bastante incierto, con un gran abanico de posibilidades a la hora de elegir un paradigma de fabricación que satisfaga las necesidades actuales. A continuación, iremos caracterizando esquemáticamente una serie de conceptos que nos servirán para afianzar ideas sobre el contexto de fabricación actual, y así, nos resultará más fácil la tarea de encontrar un paradigma de fabricación adecuado a este contexto en el que nos encontramos inmersos.

### 2.1.2. Requisitos de los sistemas de fabricación actuales.

Como ya hemos dicho, el entorno y las circunstancias existentes en un momento dado determinan de una forma clave la implementación de un sistema productivo. Las necesidades de los consumidores actuales y el nuevo orden económico mundial provocarán una situación caótica, que afectará profundamente a los sistemas de fabricación.

A continuación, resumiremos de forma esquemática los requisitos que debe cumplir un sistema de fabricación en el marco actual para ser competitivo (Bi *et al.*, 2008).

### ***2.1.2.1. Tiempos de lanzamiento de los productos reducidos.***

Conseguir unos tiempos de lanzamiento cortos afecta a un sistema de fabricación de diferentes maneras (Smith y Reinertsen, 1997). Cuanto antes es introducido un producto en el mercado, más ventajas tendrá éste sobre sus competidores, debido a que:

- El retraso en igualarlo o superarlo es mayor.
- Aumentará el pico de ventas, ya que cuanto antes entre un producto en el mercado, mayores son sus perspectivas de obtener y mantener una cuota de mercado grande.
- Los productos nuevos ofrecen un mayor margen de beneficios.

### ***2.1.2.2. Fabricación de una mayor variedad de productos.***

En la actualidad, un sistema productivo está forzado a producir una mayor variedad de productos, para satisfacer las necesidades de los consumidores, cada vez más fragmentadas, sofisticadas y personalizadas. Para conseguirlo, los productos deben poseer dos cualidades:

- La versatilidad de un producto conlleva que sea capaz de adaptarse con facilidad y rapidez a diversas funciones, para lo que dispondrá de más componentes para características adicionales.
- La personalización de un producto significa que dicho producto tiene opciones para satisfacer gustos individuales (Tseng y Du, 1998; Fralix, 2001).

### ***2.1.2.3. Volúmenes de fabricación pequeños y fluctuantes.***

Los volúmenes requeridos de muchos productos están disminuyendo, debido a diversos motivos:

- La globalización de los mercados conlleva una lucha encarnizada entre los distintos competidores, que comparten nichos de mercado.
- El ciclo de vida de un producto nuevo es cada vez menor, si bien su durabilidad es mayor. Por ello se dará la circunstancia de que productos de diferentes generaciones convivan en el mercado en un mismo momento.
- La personalización de los productos ha fragmentado las demandas del mercado en pequeñas porciones.

#### ***2.1.2.4. Bajo precio de los productos.***

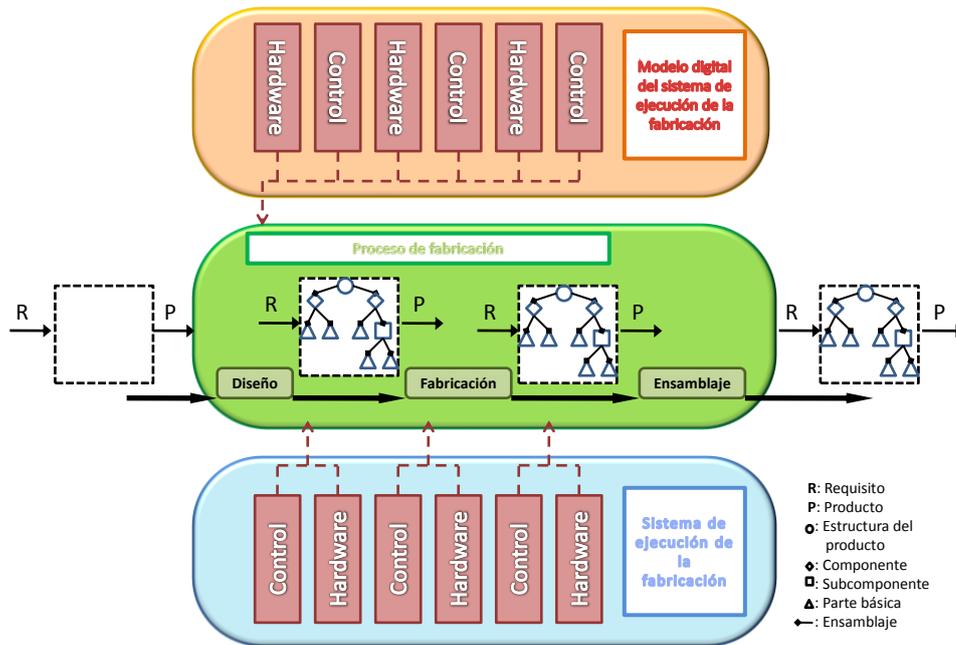
Para muchos consumidores, el precio de un producto es una característica fundamental. Ello impondrá la fabricación a bajo coste sea un objetivo fundamental de los sistemas de producción, ya que, por una parte, el mercado globalizado ofrece al cliente un mayor rango de opciones a la hora de comprar productos a bajo precio con la misma calidad de servicio, y por otra, el precio depende fuertemente del tiempo, con lo que el margen de precios es alcanzado en un momento muy cercano a la introducción del producto al mercado.

Además de estos requisitos, existen otros que no hemos mencionado, como la durabilidad y la calidad, debido a que los consumidores tienden a considerarlos como características esenciales de un producto. Por ello, serán los requisitos anteriormente mencionados los que tengan un impacto significativo en la mejor elección de los paradigmas de fabricación.

#### **2.1.3. Estrategias generales para cumplir los requisitos de un sistema de fabricación actual.**

Acabamos de sintetizar de forma bastante esquemática qué requisitos debe reunir un sistema de fabricación en las condiciones actuales de mercado para ser competitivo. Ello ha servido para introducirnos un poco más en el problema que vamos a tratar. Un buen conocimiento del sistema de fabricación podrá ayudarnos a identificar una serie de estrategias que, aplicadas a éstos, facilitarán que puedan cumplir los requisitos impuestos por el mercado.

Hay múltiples opciones a la hora de modelar un sistema de fabricación. Como puede verse en la Figura 5, podemos modelarlo en términos de actividades de fabricación directas. El significado de los símbolos y abreviaturas está explicado en la leyenda de la figura. Un sistema de fabricación se dedica a producir productos, con los que satisfacer una serie de necesidades de los consumidores. Estos productos serán ensamblados a partir de una serie de piezas básicas.



**Figura 5: Modelo de un sistema de fabricación.**

Podemos distinguir las siguientes actividades de fabricación directas (Boothroyd *et al.*, 1994):

- Diseño. En esta actividad, serán definidos los distintos componentes del sistema, y cómo serán ensamblados, según las necesidades del cliente.
- Fabricación. En esta actividad, serán fabricadas las piezas básicas de las que constan los productos.
- Ensamblado. En esta actividad, las piezas básicas serán acopladas para crear los productos finales para los consumidores.

Para lograr estas actividades, serán necesarios una serie de recursos hardware y de control. Los recursos hardware se refieren a los recursos implicados en el flujo de procesos, mientras que los recursos de control lo están en el flujo de información (Williams, 1998). Además, será necesario un modelo computacional del sistema de fabricación para el diseño y simulación de un sistema hardware.

Tras haber mostrado el modelo del sistema productivo en el que nos basaremos, enumeraremos una serie de estrategias para conseguir los requisitos de los sistemas de fabricación que detallamos en el apartado anterior. Como iremos viendo, para satisfacer los requisitos de fabricación, deberán realizarse esfuerzos en todos los ámbitos del sistema productivo.

### 2.1.3.1. Estrategias para reducir el tiempo de lanzamiento.

El tiempo de lanzamiento de un producto puede ser definido de diferentes formas. Nosotros nos referiremos con él al tiempo requerido para satisfacer el pedido de un cliente, empleado en las actividades de fabricación directas.

Como podemos ver en la Figura 6, podemos aplicar tres estrategias para reducir el tiempo de lanzamiento de un producto:

- (1) Reducir o eliminar actividades indirectas, tales como traslado y almacenamiento, que sólo provocan pérdidas al sistema. Así, los pedidos de un cliente serán satisfechos tan pronto como sea posible.
- (2) Reducir el tiempo empleado en actividades directas, mediante un incremento de la capacidad del sistema y una reducción de su tiempo de puesta a punto.
- (3) Aplicar técnicas de ingeniería concurrente, de forma que el proceso de fabricación no sea puramente secuencial, y ciertas actividades de fabricación puedan ser ejecutadas en paralelo. Gracias a ello, estas actividades pueden ser completadas con un retardo mínimo.

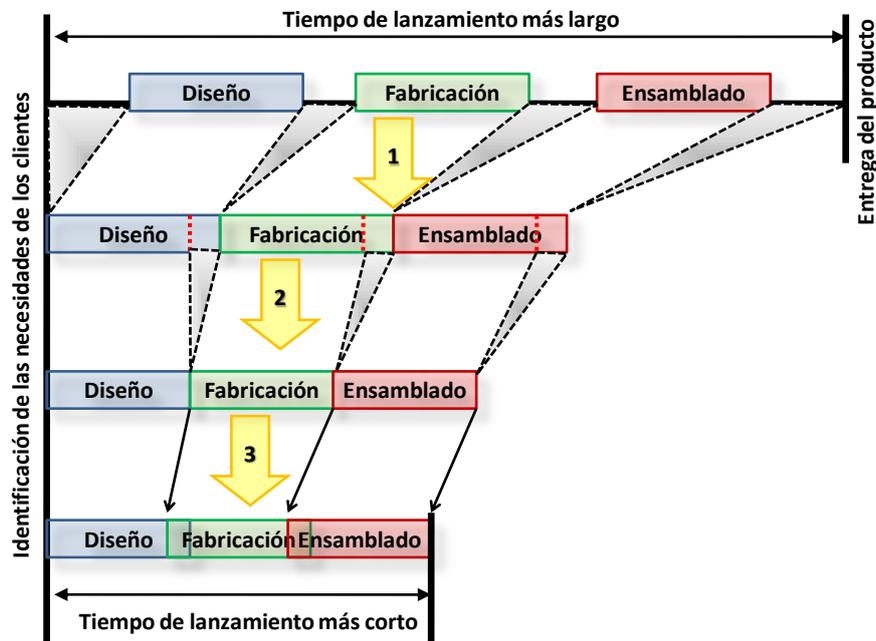


Figura 6: Estrategias para reducir el tiempo de lanzamiento.

### 2.1.3.2. Estrategias para producir una mayor variedad de productos.

Un producto final se obtiene a partir del ensamblado de una serie de piezas básicas. Distintas variantes de un mismo producto pueden obtenerse mediante el uso de diferentes tipos de piezas básicas o de distintas formas de ensamblarlas. Como mostramos en la Figura 7, para producir una mayor variedad de productos podemos aplicar tres estrategias:

- (1) Optimizar la plataforma de producción. La plataforma de producción no es más que un conjunto de subsistemas e interfaces que conforman una estructura común, a partir de la cual una multitud de productos relacionados puede ser desarrollada y producida de una forma eficiente (McGrath, 1995). La optimización de su uso hará posible que las actividades de fabricación y ensamblado estén bien equilibradas, y los recursos involucrados en ambas actividades sean usados eficientemente.
- (2) Incrementar las variantes o la versatilidad de los recursos de fabricación, de forma que una mayor variedad de productos puedan ser fabricados.
- (3) Incrementar las variantes o la versatilidad de los recursos de ensamblado, de forma que puedan ejecutarse una mayor variedad de tipos de ensamblado.

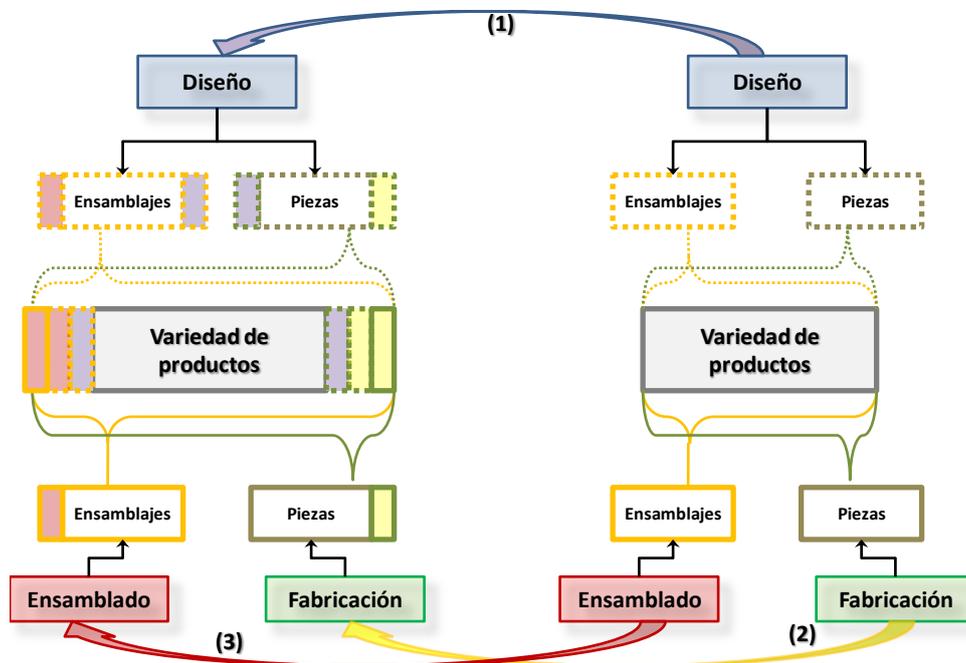


Figura 7: Estrategias para producir una mayor variedad de productos.

### 2.1.3.3. Estrategias para atender volúmenes pequeños y fluctuantes.

Una buena plataforma de producción deberá ser capaz de reducir la sensibilidad del sistema ante cambios en el volumen de productos fabricados, a causa de variaciones en la demanda de éstos. El problema es que el cambio en el volumen de productos tiene un gran impacto en la capacidad de producción requerida. Como puede apreciarse en la Figura 8, pueden aplicarse las siguientes estrategias para atender volúmenes pequeños y fluctuantes:

- (1) Modularizar la plataforma de producción. El hecho de que las piezas básicas sean intercambiables en productos parecidos, permitirá que, aunque disminuya el volumen de productos específicos, la demanda global de productos pueda mantenerse constante.
- (2) Cambiar los recursos de fabricación y ensamblado dinámicamente, de forma que se vayan adaptando a nuevos productos.

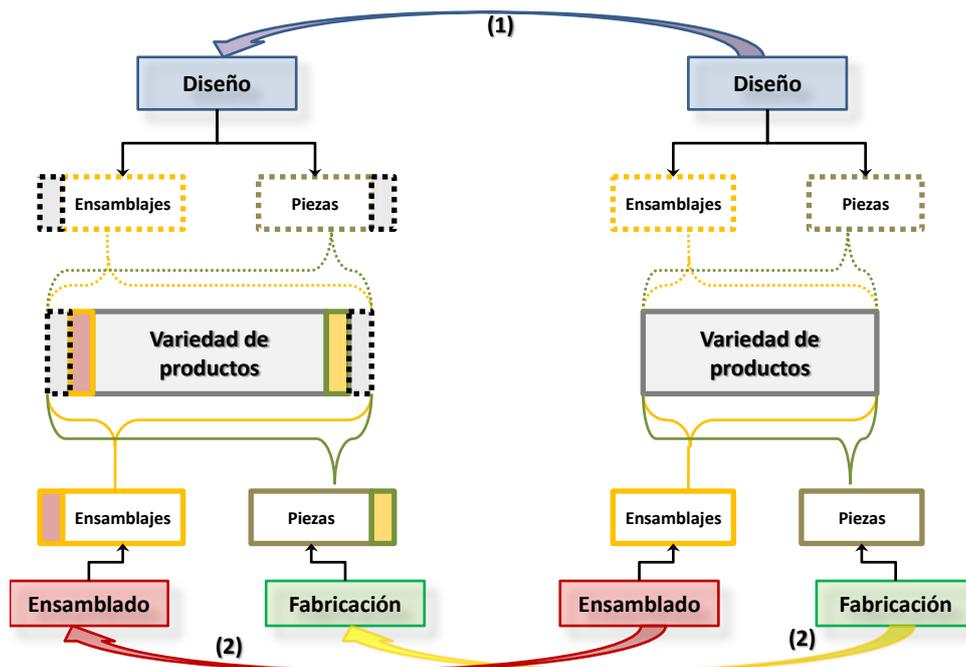


Figura 8: Estrategias para atender volúmenes de productos bajos y variantes.

### 2.1.3.4. Estrategias para reducir costes.

Como es normal, la forma en que son organizados las actividades y recursos del sistema tiene un impacto importante en el coste empleado en obtener un producto, y por tanto, en los beneficios obtenidos. Como puede verse en la

Figura 9, pueden implementarse las siguientes estrategias para lograr aumento en los beneficios:

- (1) Reducir o eliminar el coste causado por actividades indirectas, reducir el coste causado por las actividades directas y/o reducir los costes mediante una mayor integración del sistema.
- (2) Aplicar estrategias para aumentar el rendimiento del mercado.

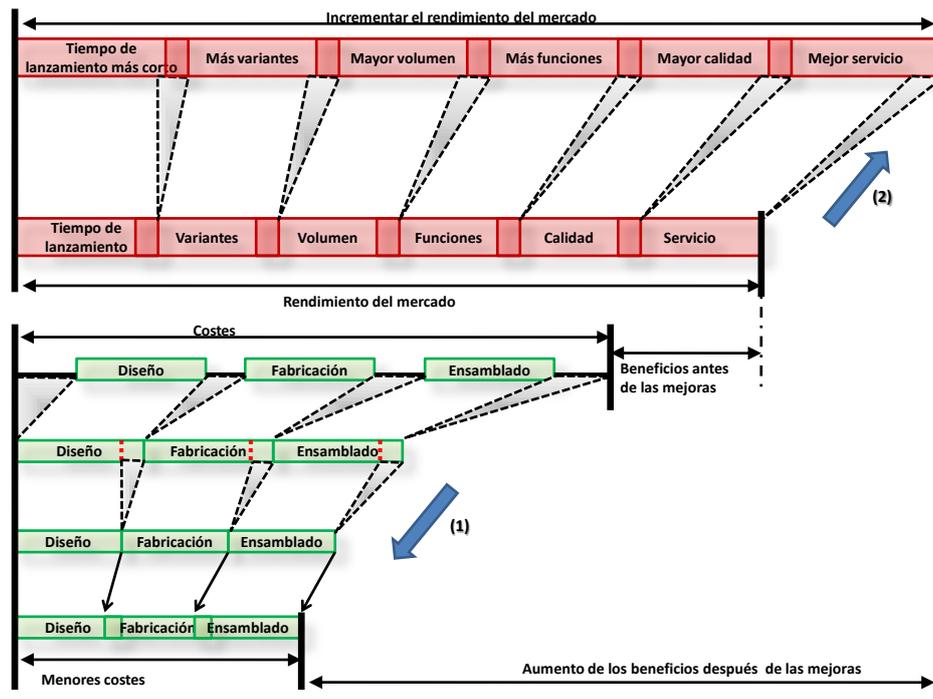


Figura 9: Estrategias para reducir costes.

#### 2.1.4. Nuevos paradigmas para implementar estrategias.

Dada la importancia del problema planteado, por los intereses económicos que están en juego, han sido desarrollados una gran cantidad de paradigmas distintos para poder modelar de una forma eficiente los sistemas de fabricación, de forma que puedan cumplir los requisitos necesarios para seguir siendo competitivos.

La gran cantidad de paradigmas existentes impone la necesidad de clasificarlos de tal forma que permita estudiar la idoneidad de uno u otro, según las prioridades que establezcamos. Para ello, nos basaremos en la taxonomía desarrollada por (Bi *et al.*, 2008), consistente en cuatro niveles de clasificación. Esta forma de clasificar los distintos paradigmas es mostrada en la Figura 10.

Los niveles emplean los conceptos que hemos ido planteando paso a paso en los apartados anteriores:

- En el primer nivel, son enumerados los cuatro requisitos principales que debe satisfacer un sistema de fabricación, que detallamos en el apartado 2.1.2.
- En el segundo nivel, se muestran las estrategias aplicadas para cumplir los requisitos planteados en el primer nivel, que detallamos en el apartado 2.1.3.
- En el tercer nivel, se aprecian los ámbitos de los sistemas de fabricación en los que dichas estrategias son aplicadas.
- En el cuarto nivel, encontramos lo que buscábamos, una serie de paradigmas de fabricación, clasificados en términos de los niveles anteriores.

Como podemos comprobar observando la Figura 10, hay varios paradigmas, muy distintos entre sí, que cumplen simultáneamente con todos los requisitos planteados (ver las siglas en la Tabla 1). Es más, es muy difícil decir qué paradigma es el mejor sin considerar una situación concreta en una empresa específica.

LP	Lean Production
JIT	Just-in-Time
AM	Agile Manufacturing (Fabricación Ágil)
VE	Virtual Enterprise (Empresa Virtual)
GM	Global Manufacturing (Fabricación Global)
MTS	Make-To-Stock
TQM	Total Quality Management (Gestión Total de Calidad)
ATO	Assembly-To-Order
ETO	Engineer-To-Order
CIMS	Computer Integrated Manufacturing System (Sistemas de Fabricación Integrada por Ordenador)
CE	Concurrent Engineering (Ingeniería Concurrente)
FMS	Flexible Manufacturing System (Sistema de Fabricación Flexible)
RMS	Reconfigurable Manufacturing System (Sistema de Fabricación Reconfigurable)
A, B, C	Unión de los paradigmas seleccionados

Tabla 1: Nomenclatura de los paradigmas de fabricación detallados en la Figura 10.

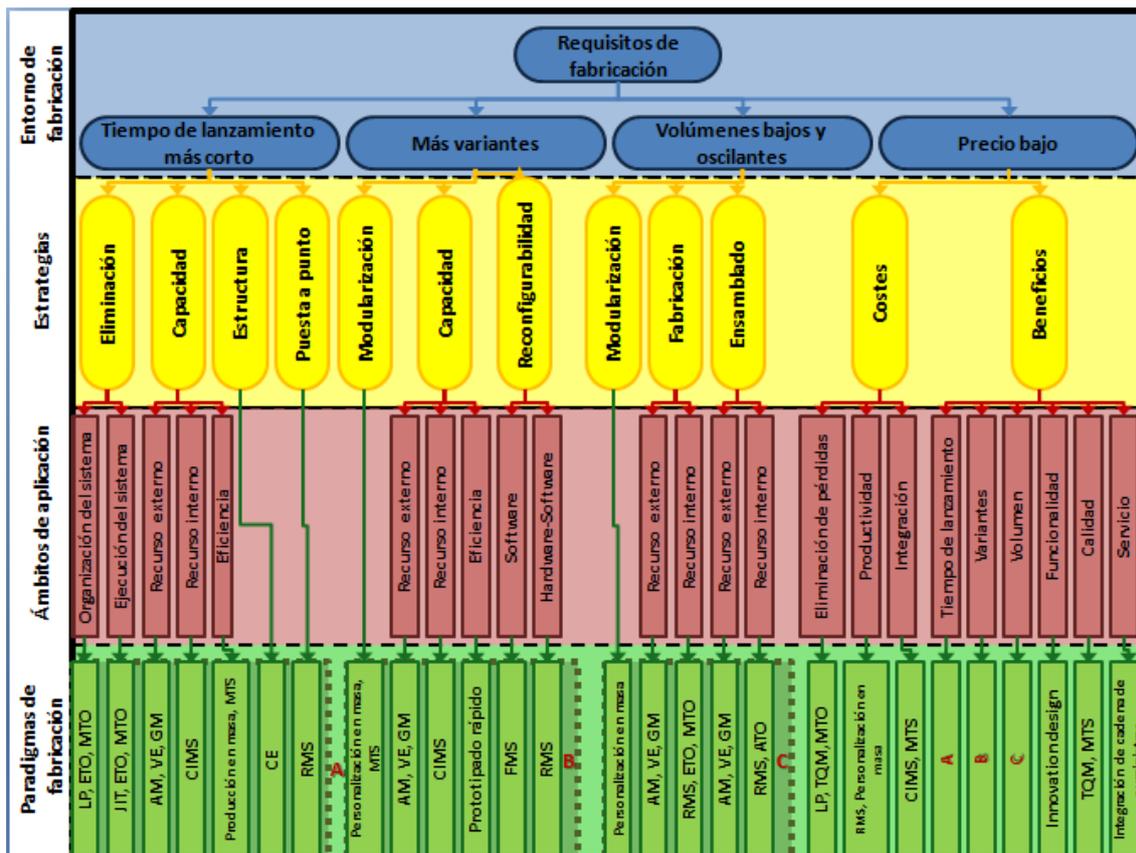


Figura 10: Taxonomía de los paradigmas de producción.

No es ámbito de este estudio describir todos estos paradigmas. En vez de eso, pasaremos a estudiar con detalle un paradigma que satisface todos los requisitos planteados: los Sistemas de Fabricación Reconfigurable. Posteriormente, propondremos una serie de variaciones a este paradigma, obtenidas a partir de otro paradigma de fabricación, el de los Sistemas de Fabricación Celular.

## 2.2. *Sistemas de Fabricación Reconfigurable.*

En el apartado anterior hemos definido el concepto de sistema de fabricación y los requisitos que han debido cumplir a lo largo de los años para ser competitivos y satisfacer las necesidades de los clientes. Después, nos hemos centrado en distintas estrategias que pueden ser aplicadas a los sistemas de fabricación para cumplir los requisitos impuestos por el mercado. Tras mostrar esquemáticamente una serie de paradigmas de fabricación desarrollados para dar solución a estas necesidades, hemos visto que uno que se adecua bien a todas es el de los Sistemas de Fabricación Reconfigurable (SFR).

### **2.2.1. Definición de un Sistema de Fabricación Reconfigurable.**

Pero, ¿qué se entiende por un SFR? Lo novedoso del estudio de estos temas hace que se produzcan controversias en algo que, en principio, debería ser tan trivial como su definición (Bi *et al.*, 2008).

Según (Koren *et al.*, 1999), un SFR es diseñado desde el principio para que sea capaz de cambiar rápidamente su estructura, tanto sus componentes hardware y software, para poder ajustar su capacidad y funcionalidad de producción rápidamente dentro de una familia de productos, en respuesta a cambios inesperados del mercado o de las medidas regulatorias. Con capacidad nos referimos al volumen, mientras con funcionalidad a la variedad, de productos generados por el sistema. Aunque la definición puede ser generalizada al sistema de fabricación completo, los autores intentaron limitar su campo de investigación al nivel de la planta de producción, tratando un SFR como un paradigma intermedio entre un SFD y un SFF.

En cambio, otros autores, como (Liles y Huff, 1990), proponen una definición más genérica, que afecta al sistema de fabricación en su totalidad, al considerar que un SFR es capaz de adaptar su configuración para satisfacer las demandas de producción, que van cambiando de forma dinámica.

A pesar de estas controversias, no cabe ninguna duda de que el concepto de SFR ha sido propuesto para hacerse cargo de los cambios e incertidumbres que se producen en el entorno de fabricación, y su objetivo puede ser alcanzado reconfigurando recursos hardware y software. La gran ventaja que aportan los SFR es que no sólo permiten flexibilidad en la variedad de productos que fabrican, sino que la permiten en el propio cambio del sistema.

La configuración modular de los SFR, permite que podamos decir que son sistemas sin un desarrollo preestablecido. En primer lugar, porque pueden ser continuamente mejorados mediante la integración de nuevas tecnologías, evitando así que se queden obsoletos. En segundo lugar, porque pueden ser rápidamente reconfigurados, mediante cambios en los componentes del sistema y de módulos software específicos para cada aplicación. Gracias a ello, podrán acomodarse a la fabricación de nuevos productos y a cambios en la demanda, en vez de ser desechados y reemplazados (Mehrabi *et al.*, 2000). Por ejemplo, podemos ver en la Figura 11 los resultados de diferentes reconfiguraciones de un SFR. En la transición del primer al segundo estado podemos ver cómo el sistema aumenta la capacidad productiva de un mismo producto (denominado producto

A), mientras en las siguientes transiciones el sistema aumenta su funcionalidad para fabricar un nuevo conjunto de productos (denominados B y C) a la vez que aumenta su capacidad, en función de los cambios del mercado.

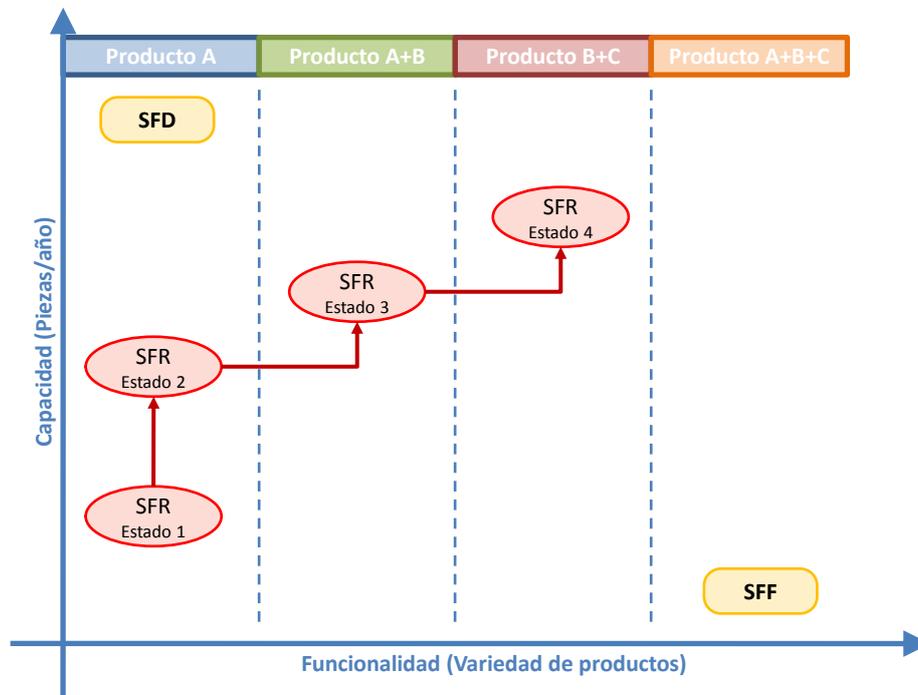


Figura 11: Escalabilidad de los SFR.

La reconfigurabilidad de un SFR puede conseguirse en varios aspectos del sistema productivo (ver Figura 12). La reconfigurabilidad de un sistema puede ser clasificada en términos de los niveles del sistema de fabricación en los que son tomadas las acciones que aporten reconfigurabilidad. Como puede verse en la Figura 13, podemos conseguirla en el nivel más bajo del sistema cambiando los recursos hardware, mientras que para conseguirla en el nivel más alto es necesario cambiar recursos software y/o elegir métodos alternativos o estructuras organizativas mediante personas flexibles. Estas medidas serán tomadas de una forma coordinada en los distintos niveles, de forma que la reconfigurabilidad del sistema pueda ser maximizada en términos de costes.

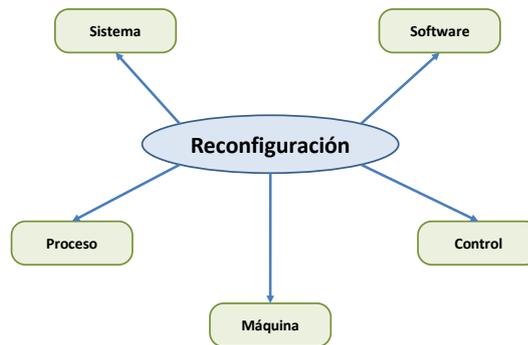


Figura 12: Aspectos de reconfiguración para un SFR.

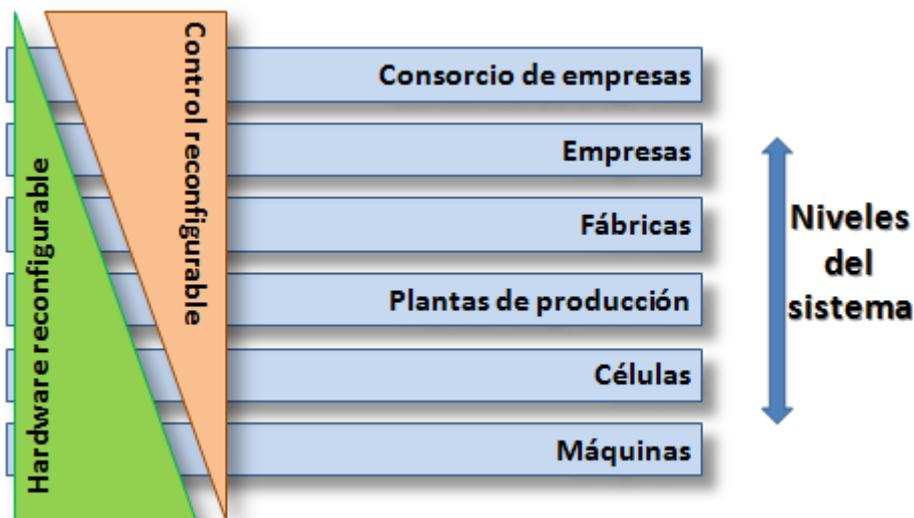


Figura 13: Organización del sistema y recursos reconfigurables.

Basándonos en la discusión anterior, es razonable extender la definición de un SFR a (Bi *et al.*, 2008):

“Un Sistema de Fabricación Reconfigurable tiene la habilidad de reconfigurar sus recursos hardware y de control en todos los niveles funcionales y organizativos, para ajustar rápidamente su capacidad de producción y su funcionalidad, en respuesta a nuevas circunstancias”.

En esta definición hay dos conceptos que conviene que sean analizados con un poco más de detalle. Con “recursos” nos referimos a una gran variedad de componentes que conforman el SFR, como son el propio sistema de producción en su totalidad, mecanismos de máquinas, sensores y algoritmos de control. En

“nuevas circunstancias”, podemos englobar cambios en la demanda de un producto, nuevas medidas regulatorias, o la integración de una nueva tecnología de procesado en el sistema de fabricación existente.

### **2.2.2. Características básicas de un Sistema de Fabricación Reconfigurable.**

Tras definir de una forma general qué es un SFR, procedamos a enumerar y discutir someramente las características que debe poseer un sistema de fabricación para ser considerado como tal (Mehrabi *et al.*, 2000). Éstas deberán tenerse en cuenta a la hora de diseñar, y posteriormente implementar un SFR.

- Modularidad. Los componentes del sistema, tanto hardware como software, y los elementos estructurales, como ejes, controles, software, y utillaje, son modulares.
- Integrabilidad. El sistema y sus componentes están preparados para integrar módulos de forma rápida y precisa mediante un conjunto de interfaces mecánicas, de potencia y de control. Además, están preparados para la introducción de nuevas tecnologías en un futuro.
- Personalización. Es la capacidad de adaptar la flexibilidad personalizada, es decir, no general, de las nuevas máquinas y sistemas productivos para dar respuesta a las necesidades de los consumidores.
- Escalabilidad. Es la capacidad de cambiar la capacidad productiva fácilmente mediante la recolocación o cambio de componentes dentro del sistema.
- Convertibilidad. Es la capacidad de transformar fácilmente la funcionalidad de los sistemas, máquinas y controles para afrontar los nuevos requisitos productivos que impone el mercado.
- Diagnosticabilidad. Es la capacidad de identificar automáticamente el estado de un sistema, para detectar y diagnosticar rápidamente las posibles causas de sus problemas de calidad y fiabilidad, y poder corregirlos rápidamente.

La modularidad, la integrabilidad y la diagnosticabilidad reducen el tiempo y esfuerzo de la reconfiguración. Por otro lado, la personalización, la escalabilidad y la convertibilidad reducen el coste. Por tanto, estas características determinan la facilidad y coste de la reconfigurabilidad de los sistemas de fabricación. Un sistema que posea estas características tiene un alto nivel de reconfigurabilidad.

Por tanto, estas características pueden resumirse en la siguiente sentencia (Mehrabi *et al.*, 2000):

“Un SFR debe ser **diseñado rápidamente**, capaz de **cambiar/convertirse rápidamente** a la producción de nuevos modelos, de **ajustar** rápidamente su **capacidad** y de integrar tecnología y producir una creciente **variedad de productos** en cantidades impredecibles”.

### **2.2.3. Principios fundamentales de la Fabricación Reconfigurable.**

Los SFR operan según un conjunto de principios básicos, enunciados por (Koren, 2003). Un sistema de fabricación es tanto más reconfigurable cuanto mayor sea el número de estos principios que le sean aplicables. Éstos son los siguientes:

- Para mejorar la sensibilidad a los cambios de un sistema de fabricación, las características básicas de los SFR deben aplicarse a todo el sistema y sus componentes (mecánicos, de comunicaciones y controladores).
- El SFR posee recursos de producción ajustables para solventar requerimientos inminentes, para lo que su capacidad es rápidamente escalable en incrementos óptimos, mientras su funcionalidad es rápidamente adaptable a la fabricación de nuevos productos.
- El SFR se diseña para una determinada familia de piezas o productos, con la flexibilidad personalizada suficiente para fabricar todos los productos de la familia.
- El SFR se diseña para ser capaz de fabricar diversos productos de una familia en cantidades diferentes.
- El SFR posee un conjunto económico de equipamiento reconfigurable con flexibilidad personalizada, tales como las máquinas reconfigurables, cuya funcionalidad y productividad se pueden cambiar fácilmente cuando sea necesario.
- En general, los sistemas con un mayor número de rutas alternativas para fabricar un producto son más reconfigurables, pero requieren mayor inversión en herramientas y equipo de manejo de materiales.
- El SFR posee el hardware y software necesarios para responder de forma efectiva en términos de coste en los momentos imprevistos, como por ejemplo, un cambio en el mercado o un fallo de una máquina.
- La organización de la mano de obra que opera con el SFR se estructura según las características básicas de los SFR.

#### **2.2.4. Concepto de familia de productos.**

El concepto de familia de productos es utilizado por varios paradigmas, y lo introdujimos cuando hablamos de los SFF. También lo trataremos cuando hablemos de Tecnología de Grupos.

Una familia de productos es un conjunto de productos que son similares, debido a que poseen una forma geométrica o un tamaño parecido, o bien, porque los pasos requeridos en su fabricación son similares (Groover, 2001). De una forma un poco más formal, podemos decir que los atributos que determinan la pertenencia a una u otra familia de productos pueden ser:

- Atributos de diseño, como la forma geométrica del producto, sus dimensiones, el material del que está constituido, las tolerancias permitidas en su proceso de fabricación.
- Atributos de fabricación, relacionados con la secuencia de operaciones con el que son llevados a cabo, la maquinaria empleada, etc.

La constitución de familias de productos es un aspecto crucial de los SFR, y se basa en el hecho de que productos parecidos pueden requerir sistemas productivos similares. Por tanto, cualquier sistema productivo que fabrique un producto de una familia puede producir, de forma esencial, los demás productos de esa familia. Los SFR tienen la capacidad y funcionalidad requerida para fabricar una familia de productos, por lo que son efectivos en términos de costes.

Los productos están compuestos por más de un componente. A su vez, cada componente puede tener más de una variante, que proporcionan los distintos tamaños, aptitudes, es decir, las características necesarias para conseguir una variedad de productos, que conformarán una familia (Yigit *et al.*, 2002). Por lo tanto, pueden obtenerse familias en tres niveles distintos: a nivel de productos, de componentes de productos y, por último, de variantes de componentes. En (Mehrabi *et al.*, 2000) se define una familia de productos como aquella que está compuesta de uno o más productos que comparten algunas características y que pueden ser fabricados en un mismo sistema productivo o en otro similar. Las relaciones entre productos, componentes y variantes pueden observarse con un ejemplo en la Figura 14.

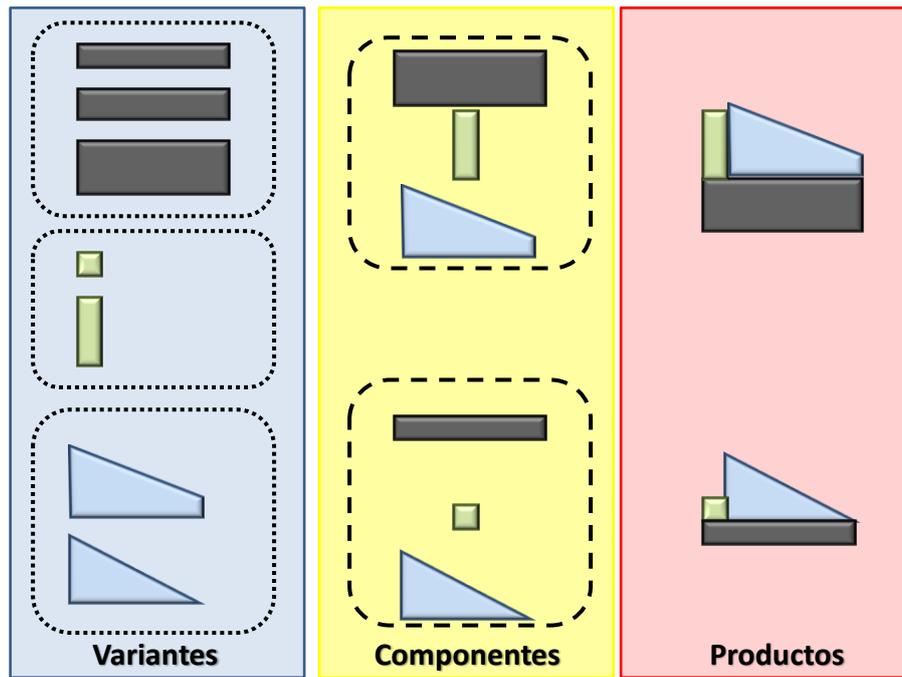


Figura 14: Relación entre productos, componentes y variantes.

Las familias se caracterizan por tener pocas similitudes con los miembros de otras familias y muchas similitudes con miembros de la misma familia (Jiao *et al.*, 2003). Esto puede verse en la Figura 15, donde los componentes de la familia A son muy parecidos entre sí, pero muy distintos a los de la familia B, y viceversa.

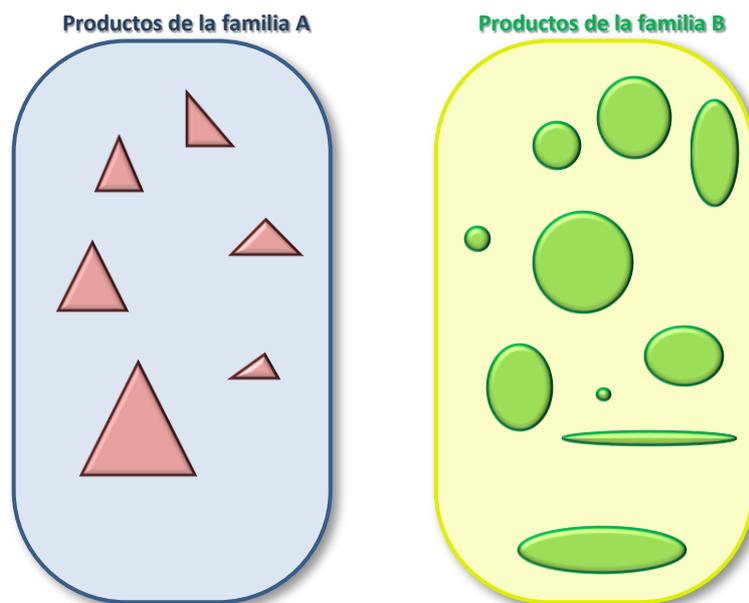


Figura 15: Similitud entre miembros de familias de productos.

Un producto complejo es aquel que está formado por más de de un componente. Estos componentes pueden ser modulares (diseñados para formar parte de más de un producto) o singulares (diseñados específicamente para un determinado producto). Con esto, se puede definir a un producto modular como aquel que está compuesto por uno o varios módulos (Gershenson *et al.*, 2003).

Se puede conseguir una gran variedad de productos a través del diseño de componentes modulares, a la vez que se reduce el número de componentes a fabricar (Yigit *et al.*, 2002). Otros beneficios obtenidos al trabajar con productos modulares son las economías de escala, reducción del tiempo de producción y mayor facilidad en la inspección de componentes (Galán, 2006). En la Figura 16 se muestra la variedad de productos que pueden ser generados mediante todas las posibles combinaciones de componentes para un SFR formado por tres máquinas reconfigurables.

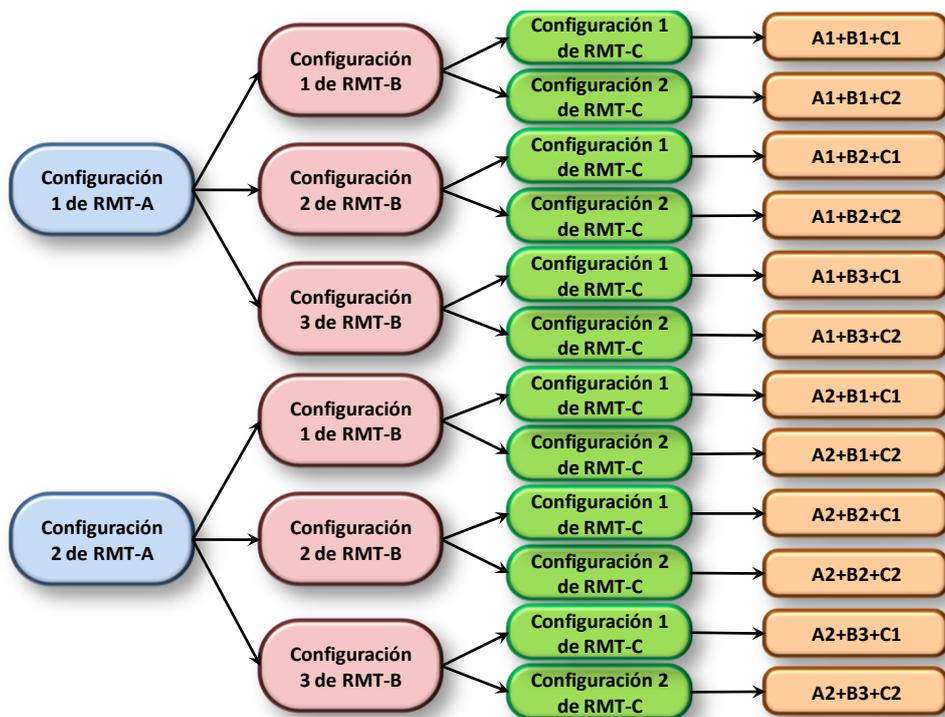


Figura 16: Variantes de un producto obtenidas por la combinación de distintos componentes.

A pesar de los beneficios enunciados anteriormente, hay que destacar que los productos modulares dan peores resultados que los productos fabricados de forma personalizada, pues toda generalización supone una pérdida de especificaciones.

## 2.2.5. Aspectos de diseño de un SFR.

Cualquier tipo de SFR comparte una serie de cuestiones críticas. Para explicar estas cuestiones, tomaremos como ejemplo el sistema robótico reconfigurable de la Figura 17. Estas cuestiones críticas incluyen el diseño de la arquitectura, el diseño de la configuración y el diseño del control del sistema (Bi *et al.*, 2008).

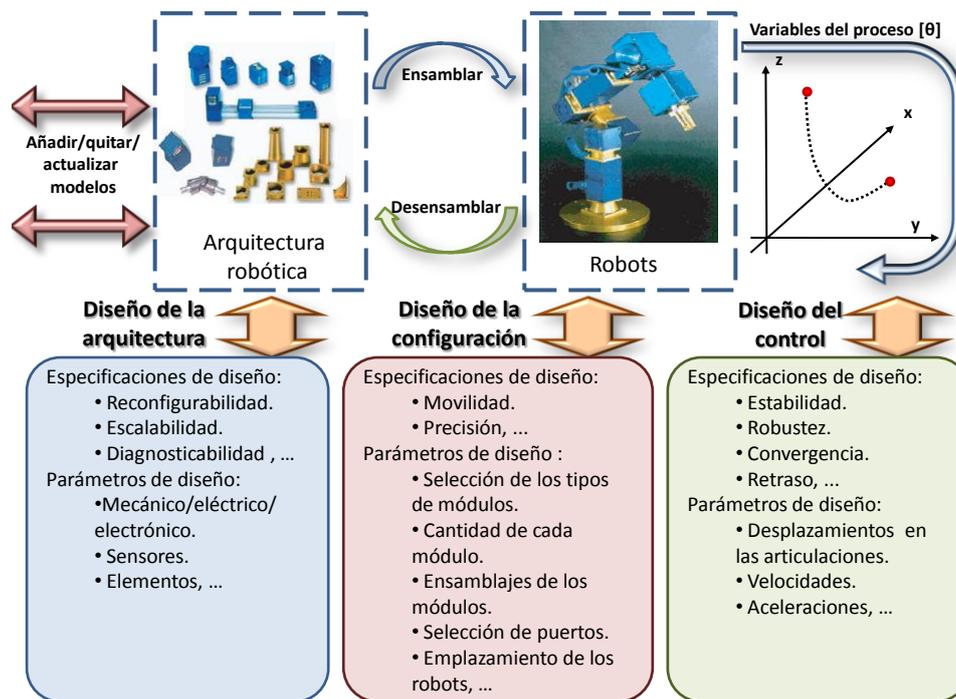


Figura 17: Aspectos de diseño de un SFR.

### 2.2.5.1. Diseño de la arquitectura de un SFR.

El diseño de la arquitectura determina los componentes de los que está compuesto el sistema y las posibles opciones que existen a la hora de ensamblarlos. Por lo tanto, la arquitectura del sistema determina todas las variantes que el sistema puede adoptar en su configuración, que le permitirán combatir los cambios e incertidumbres externas, de una forma efectiva en términos de costes. Es importante destacar que la arquitectura debe diseñarse para que disponga de las características básicas de un SFR.

Como podemos ver en la Figura 18, un SFR consta de un sistema reconfigurable hardware y de un sistema reconfigurable software. La parte hardware estará formada por:

- Sistemas de máquinas reconfigurables.

Las máquinas reconfigurables son, junto a las máquinas CNC, uno de los principales elementos que forman los SFR. Estas máquinas, como ya hemos mencionado anteriormente, son ajustables tanto en capacidad, como en funcionalidad, con lo que mediante cambios en su configuración serán capaces de hacer frente a los cambios en la demanda, en cuanto a cantidad y variedad de los productos o piezas que solicitan los clientes.

El diseño de estas máquinas se basa en una librería de módulos, que incluye una variedad de opciones seleccionables, como cambiadores de herramientas, deslizadores en distintos ejes, fijaciones, ejes y columnas que realizan funciones específicas de mecanizado o de movimientos. La reconfiguración se consigue retirando, añadiendo o cambiando los módulos de la máquina.

Ejemplos de reconfiguraciones que tendrán que soportar estas máquinas, pueden ser (Koren, 2003) cambios en el tamaño y/o geometría de la pieza, en el volumen y tasa de producción, cambios en el proceso de mecanizado o cambios de la precisión requerida en el mecanizado.

- Sistemas de utillaje reconfigurables.

Con utillaje nos referimos a un montaje de elementos (Muñoz *et al.*, 2004) que determina la unión entre la pieza y la máquina que la procesa. Determinan la localización, orientación y sujeción de la pieza, por lo que es un aspecto importante dentro del sistema productivo.

- Sistemas de ensamblado reconfigurables.

Estos sistemas se encargan de ensamblar las piezas básicas que conformarán un producto.

- Sistemas de tratamiento de materiales reconfigurables.

Estos sistemas se encargan del traslado de los materiales y de piezas a través del sistema de fabricación.

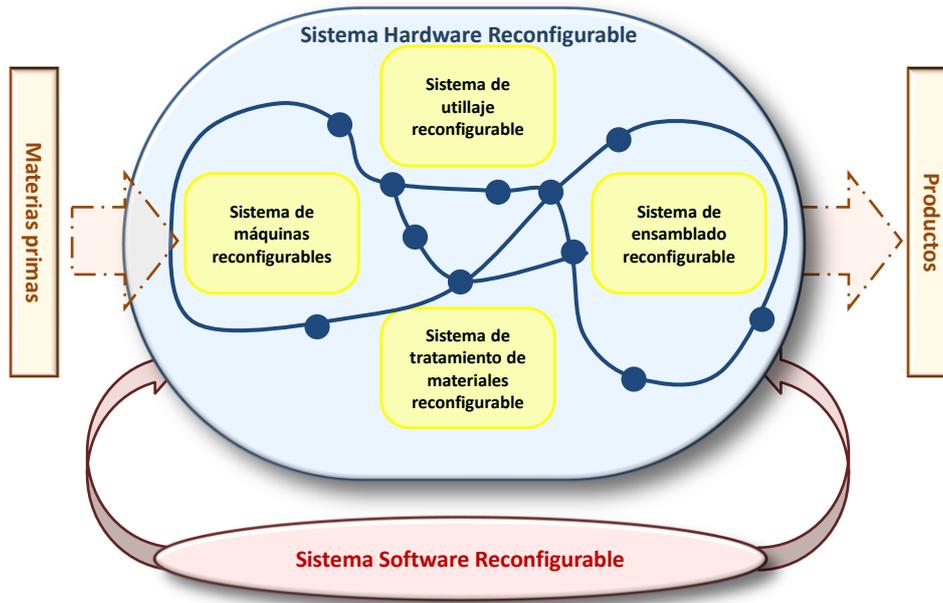


Figura 18: Escenario de aplicación de un SFR.

### 2.2.5.2. Diseño de la configuración de un SFR.

El diseño de la configuración determina la configuración del sistema bajo una arquitectura dada del sistema para llevar a cabo una tarea específica. Una configuración no es más que el ensamblado de los módulos seleccionados, de tal forma que pueda llevar a cabo la tarea dada de forma óptima. Por tanto, podemos considerar el diseño de la configuración como un problema de optimización, que parte de una serie de variables de diseño, que incluyen los tipos de módulos, su número, y parámetros internos de éstos, y de unas restricciones de diseño, derivadas de las especificaciones de la tarea a realizar y de estrategias de negocio.

Dentro de los ámbitos de un SFR, nuestra investigación se centrará en el diseño de la configuración. Esto será debido a que partiremos de una arquitectura del sistema dada, para encontrar la configuración del sistema más adecuada según las condiciones en las que nos encontremos.

### 2.2.5.3. Diseño del control de un SFR.

El diseño del control determina las variables de proceso apropiadas (desplazamientos de articulaciones, velocidades, etc., de un módulo articular), tal

que una configuración puede ser empleada para llevar a cabo la tarea para la que ha sido dispuesta de forma satisfactoria.

## ***2.3. Células de Fabricación Reconfigurable.***

### **2.3.1. Necesidad de Fabricación Celular.**

Como ya hemos destacado en apartados anteriores, el consumidor actual es cambiante, con gustos altamente personalizados. Debido al desarrollo de las tecnologías de la información, un número cada mayor de consumidores es capaz de hacer pedidos online, personalizados a sus gustos, esperando recibirlos en un plazo de tiempo reducido. La implantación de una economía globalizada provoca que exista un alto nivel de competitividad a la hora de proporcionar un mismo servicio, por lo que fabricar productos altamente personalizados de una forma óptima en cuanto a costes, en un tiempo reducido, se ha convertido en un objetivo importante por parte de las empresas para poder mantenerse en el mercado.

Una técnica que surge para adaptar las instalaciones de fabricación a las necesidades de los consumidores, a una producción personalizada, es la “personalización en masa” (Svensson y Bradford, 2002). Esta técnica, más conocida por el término anglosajón “mass customization”, tiene como objetivo fabricar grandes cantidades de productos personalizados, de una forma rápida, a bajo coste y con alta calidad (Tu *et al.*, 2004). Por tanto, se le exige a los sistemas de fabricación que sean capaces de fabricar una amplia gama de productos en cantidades medias, no tan grandes como los que usan los sistemas de fabricación en masa.

Es considerada como una de las grandes estrategias de fabricación y su implementación requiere de la atención de las distintas y complejas elecciones de los clientes en cada momento (variedad de productos), economía de escala (eficiencia en masa) y gran flexibilidad (rápida adaptabilidad) en los procesos de fabricación (Jiao *et al.*, 2003). Está guiando el desarrollo e implementación de los nuevos sistemas de fabricación en las próximas décadas, en lo que se conoce como Sistemas de Fabricación de Nueva Generación (*Next-Generation Manufacturing Systems, NGMS*).

Los NGMS deben responder de una forma rápida a los continuos cambios en la demanda de productos, de forma efectiva en costes (Lei *et al.*, 1998). La entrega rápida de productos personalizados al cliente en cantidades variables,

obligará a los sistemas de fabricación a usar nuevas tecnologías que incorporen flexibilidad, reconfigurabilidad e inteligencia (Molina *et al.*, 2005). En este sentido, los SFR han surgido en los últimos años para afrontar estos retos.

Como ya hemos descrito, los SFR lanzan productos al mercado teniendo en cuenta los requisitos de la personalización en masa sobre una rápida respuesta al mercado, coste y calidad. Además, cumplen los requisitos en cuanto a coste, personalización y rápida adaptación. Sin embargo, no es el único paradigma que ha sido planteado para responder a este problema. A continuación, plantearemos otra filosofía de fabricación desarrollada para dar respuesta a este problema, los Sistemas de Fabricación Celular (SFC), para posteriormente combinarla con los SFR.

### **2.3.2. Fabricación Celular.**

#### **2.3.2.1. Tecnología de Grupos.**

Para poder hablar de fabricación celular, debemos empezar hablando de la Tecnología de Grupos, que es un enfoque al problema de gestión, aplicado en diversas áreas de la ingeniería. En realidad, más que una tecnología, se entiende como una metodología, que aplicada al contexto de la fabricación, busca identificar piezas o productos parecidos y agruparlos en diversas familias para aprovechar las ventajas de sus similitudes en el diseño e implementación del sistema productivo (Suresh y Kay, 1995).

El origen de la Tecnología de Grupos (TG en adelante) se remonta a la década de los 20 del pasado siglo (Groover, 2001). El estadounidense R. Flanders dio los primeros pasos en 1925, al presentar ante la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos cómo organizaban la producción en la empresa *Jones and Lamson Machine Co.* En primer lugar, expuso las desventajas de los sistemas organizados por procesos, en los que existe una especialización de departamentos o secciones en procesos concretos, constituidos por máquinas y personal que se dedican a tareas similares. Existe un movimiento de productos entre las distintas secciones, donde se les aplicarán varias operaciones, siendo necesario planificación y control para cada una de ellas (ver Figura 19). Este movimiento constante entre departamentos implica que los productos dediquen gran parte de su tiempo en esperar antes y después de su procesado, en el transporte y en la preparación de las máquinas, con lo que reduce la velocidad del flujo de los mismos, divide la responsabilidad y dificulta el control.

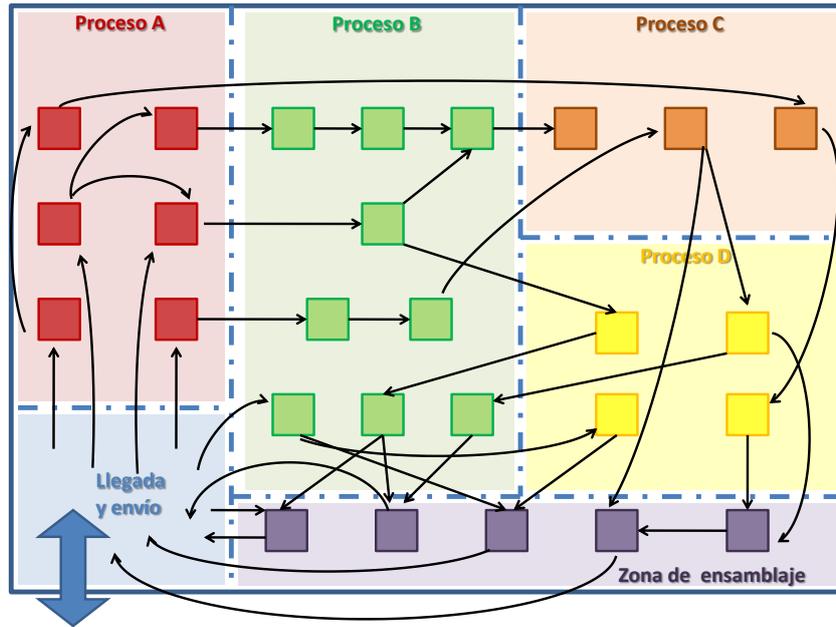


Figura 19: Planta de producción organizada por tipo de procesos.

La alternativa que propuso fue ordenar las instalaciones por producto, de forma que cualquier pieza permanezca en un único departamento hasta su finalización (ver Figura 20). De esta manera, se eliminan largas esperas, y en consecuencia, espacio de almacenamiento y stocks inactivos.

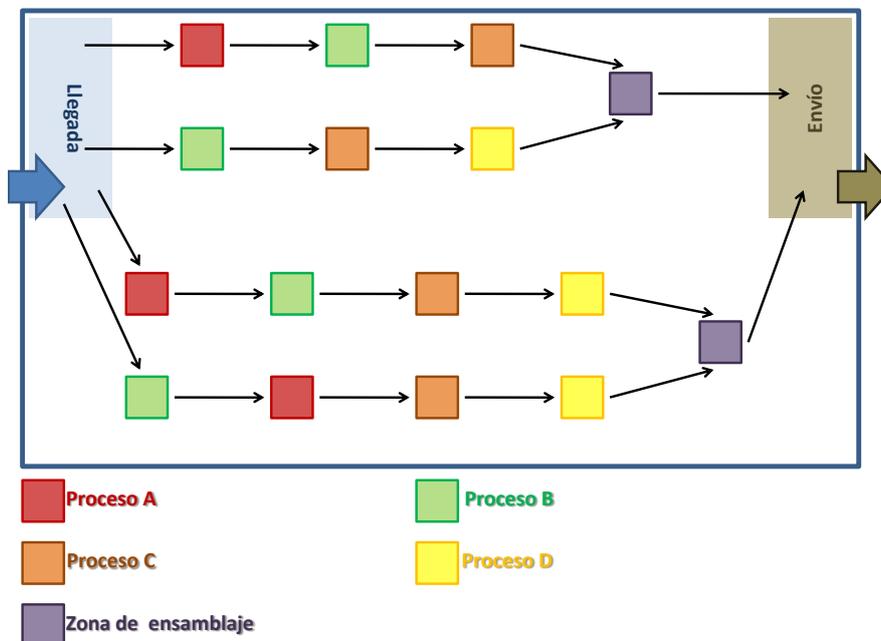


Figura 20: Planta de producción en Tecnología de Grupos.

Sin embargo, no fue hasta los años 50 cuando los inconvenientes de los sistemas de producción por procesos se hicieron más significativos. Por ello, el

investigador ruso Mitrofanov analizó el problema en profundidad, formalizando esos conceptos en su libro *Principios científicos de la Tecnología de Grupos*. Este libro tuvo tal repercusión, que en pocos años más de 800 fábricas en Rusia aplicaban la TG en sus sistemas de producción (Groover, 2001).

A lo largo de los 60, otros autores profundizaron en este estudio, de los que cabe destacar al canadiense John Burbidge. A pesar de una disminución en el interés por este tema en la década de los 70, renació con fuerza con la llegada de la filosofía de fabricación japonesa, principalmente JIT (Just In Time), CIM (Computer Integrated Manufacturing) y los SFF. Desde entonces, la investigación en estos temas ha sido imparable: muchos investigadores han desarrollado técnicas para la agrupación pieza-máquina, sistemas expertos para el diseño y la planificación de procesos mediante ordenador, nuevos métodos de reconocimiento de patrones para identificar familias de productos, modelos de simulación para el diseño de células y otros desarrollos relacionados con la TG.

Esta metodología es aplicable a varios aspectos de un sistema productivo (Suresh y Kay, 1998):

- Identificación de familias de piezas.

Una tarea previa a la implantación de la TG es la identificación de familias de productos. Como ya mencionamos cuando hablamos de este concepto en el apartado de los SFR, las características que pueden llevar a agrupar un conjunto de productos en una determinada familia son variadas, y pueden ir desde una forma geométrica parecida, a que los pasos requeridos para su fabricación sean similares. Este paso previo suele ser un obstáculo para que las empresas se decidan a aplicar esta metodología a su sistema productivo, ya que debido al gran número de productos a fabricar, esta tarea suele ser ardua y costosa. Eso sí, las ventajas que se derivan son significativas, permitiendo ahorrar apreciablemente, entre otras cosas, en la fase de diseño de los productos y en la planificación de procesos.

- Ingeniería de diseño.

La creación de una base de datos con los productos codificados, permite un importante ahorro a la hora de diseñar un nuevo producto. Esto es debido a que puede comprobarse si ya se está fabricando un producto parecido, y en caso afirmativo no será necesario diseñar el producto desde el principio, sólo tendremos que hacer cambios puntuales. Ello conlleva una reducción del esfuerzo y del tiempo de ciclo en la ingeniería, un aumento de la productividad y

diseños más realistas y sostenibles. Se reducen también el número de diseños y de planes de procesos ya creados.

Otra aplicación importante en este ámbito es la simplificación y estandarización de los parámetros de diseño, que trae como consecuencia la reducción del número de herramientas que pueden utilizarse y de la cantidad de datos y de información que tiene que manejar la empresa. La disminución de los diseños de productos, de los atributos de diseño, trae como consecuencia un menor número de documentos de diseño, de planes de diseño y otros documentos de datos.

- Planificación de los procesos.

La fase de diseño de un producto está íntimamente relacionada con la de planificación de los procesos, ya que esta última materializa en una entidad física lo descrito en la primera. Por ello, la TG tiene un efecto parecido en ambas fases del sistema productivo. En el ámbito de la planificación de procesos, la TG se aplica en sistemas de planificación de procesos por ordenador (CAPP), utilizando métodos generativos o métodos variantes.

En los métodos generativos, la lógica de los planes de procesos se almacena en una base de conocimientos junto con los algoritmos que definen las decisiones técnicas. A partir del nuevo diseño y considerando los procesos de producción admisibles, se obtiene el plan de proceso. En los métodos variantes, se recupera el plan de proceso de un producto similar diseñado antes, a partir de la codificación de la TG, y se hacen pequeñas modificaciones. Esto es coherente con el hecho de que productos pertenecientes a una misma familia, al ser parecidos, requerirán pasos parecidos para ser fabricados.

- Tecnología de Grupos en distribución en planta o Fabricación Celular (FC).

En talleres tradicionales, la distribución de las máquinas se basa en la especialización por procesos, situando juntas máquinas similares y personal con semejante habilidad. Sin embargo, en TG se crean células o grupos de máquinas basándose en la especialización de las familias de productos. Con ello se alcanzan una serie de beneficios en los que profundizaremos posteriormente.

- Planificación y control de la producción en Fabricación Celular.

Debido a que las operaciones en las células tienen ciclos cortos, uno de los primeros efectos consiste en que no se pueden aplicar los métodos clásicos de

control de stocks o del cálculo del lote económico. Sistemas MRP (Material Requirements Planning) combinados con JIT son ampliamente utilizados en FC.

- Impacto en otras funciones.

TG y FC tienen otras implicaciones en funciones de la producción como, control de la calidad, gestión de la calidad total, logísticas JIT, contabilidad de costes y gestión de recursos humanos. En este último caso, la FC tiende a operarios con menos especialización y con más conocimientos multi-funcionales.

### **2.3.2.2. Sistemas de Fabricación Celulares.**

Como ya mencionamos brevemente en el apartado anterior, una de las aplicaciones de la Tecnología de Grupos en el ámbito de la fabricación son los Sistemas de Fabricación Celulares (SFC).

La fabricación celular consiste en la agrupación de productos con similares características de diseño, funciones, materiales o necesidades de procesamiento, en familias, y su posterior asignación a grupo de recursos comunes, denominados células. De esta manera, en el caso ideal, cada producto podrá ser procesado en su célula correspondiente, sin necesidad de salir a otra para completar ninguna operación. Esta independencia entre células permitirá optimizar el sistema de fabricación, ya que conllevará una disminución en los tiempos de espera y en almacenamientos innecesarios, que eran los máximos inconvenientes de los sistemas organizados por procesos. Un aspecto importante que limita el número de células que pueden implementarse es que la inversión de capital en cuanto a recursos debe mantenerse en un nivel compatible con la estrategia de la empresa (Chu, 1995).

Es importante destacar que, si bien muchos investigadores simplifican una célula a un conjunto de máquinas dedicadas a la fabricación de productos similares, tal y como hemos mencionado en la definición, el concepto de célula es más genérico. Dentro del término recursos podemos englobar a máquinas, herramientas, operarios, equipos empleados en el traslado de material (ver Figura 21). Cada uno de estos tipos de recursos impondrá diferentes desafíos a la hora de diseñar y poner en funcionamiento el SFC. Generalmente, la inclusión de una mayor variedad de tipos de recursos hará más complejo el problema de diseño. Por ejemplo, la inclusión de personas impone la necesidad de considerar asuntos de organización además de los operacionales (Nomden *et al.*, 2006). Generalmente, el hecho de que aparezcan o no determinados recursos vendrá determinado por el contexto y el tipo de sistema productivo. Para hablar de una

forma más genérica de estos recursos, podemos emplear el término estaciones de trabajo.

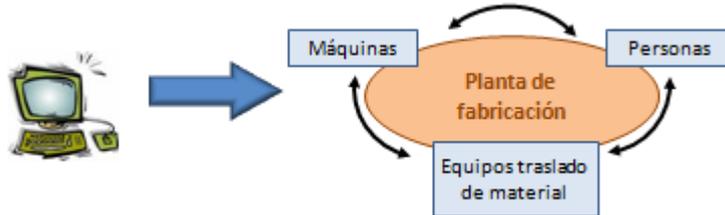


Figura 21: Distintos recursos empleados en SFC.

La división del sistema de producción en estas células conlleva una serie de ventajas, tales como una reducción del tiempo de ciclo de fabricación, una reducción en la manipulación de materiales, una disminución de los inventarios en proceso y del espacio requerido, menores tiempos de preparación y del tamaño del lote, mejor control de las operaciones, etc. Por tanto, gracias a ello, pueden asimilarse características de los sistemas de producción en masa, como una alta rentabilidad, a sistemas de fabricación en los que los tamaños de los lotes de productos son pequeños.

Como contrapartida, esta división del sistema de producción conlleva una menor utilización de recursos. Además, estos sistemas sufren de una falta de flexibilidad a la hora de enfrentarse a las variaciones que el mercado impone en cuanto a la fabricación de nuevos productos, o de distintas cantidades de éstos. Una vez que una célula es formada para unas familias de productos, se muestra bastante complicado modificar los recursos que la conforman para satisfacer los nuevos requisitos que el mercado impone. Por ello, será necesaria la utilización de recursos pertenecientes a otras células, permitiéndose movimientos intercelulares de los productos, que disminuirán la independencia de las células y la eficiencia del sistema. Otra opción es redistribuir el sistema en nuevas células, o duplicar las máquinas en distintas células, pero es altamente costoso. Por ello, llegará un momento en que sea más eficiente el sistema clásico organizado por procesos y deje de ser rentable la fabricación celular.

Estos inconvenientes han provocado numerosas dudas sobre la viabilidad de su implementación, que se han visto reflejadas en su limitada implantación en las empresas (Wisner y Sifer, 1995), por lo que han sido muchos los investigadores que han intentado dotar de cierta flexibilidad a estos sistemas de fabricación sin necesidad de modificar la configuración física de las células.

Uno de los paradigmas de fabricación propuestos para solucionar estos problemas es el de las células virtuales (ver Figura 22). El paradigma de los Sistemas de Fabricación Celular Virtuales (SFVC) data de finales de los 70, pero no fue hasta 1982 cuando fue definido formalmente por (McLean *et al.*, 1982). Desde entonces, ha sido ampliamente tratado en la literatura, con distintas líneas de investigación según los grupos de trabajo, pero con una filosofía común. En estos sistemas de fabricación se dedican una serie de recursos a la fabricación de una familia de productos, sin que esa agrupación tenga que verse reflejada en la estructura física del sistema productivo. Así, dependiendo de las necesidades de fabricación de cada momento, los recursos de distintos departamentos serán agrupados, sin necesidad de que sean adyacentes. Esta identificación de grupos lógicos de recursos de un sistema productivo permite que puedan obtenerse las ventajas de la Fabricación Celular en sistemas de fabricación ya implantados, sin necesidad de modificarlos físicamente.

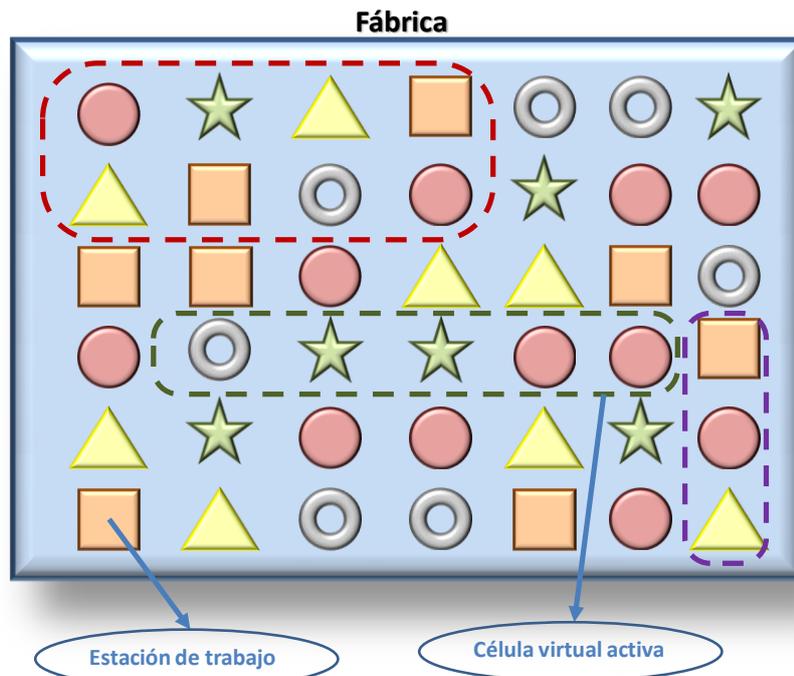


Figura 22: Planta de producción de un SFVC.

El diseño de un sistema productivo puede ser descompuesto en el diseño físico y en el diseño lógico (Nomden *et al.*, 2006). El diseño físico está relacionado con la topología y configuración de los sistemas físicos, que incluyen máquinas, personas y sistemas de traslado de material, mientras el diseño lógico está relacionado con la forma en que las actividades de fabricación están organizadas y controladas. Las células de fabricación virtuales hacen uso de este principio, distinguiendo grupos de recursos en el plan de producción y en la fase

de control que no están reflejados en la distribución en planta. Esto previene que sea necesaria una reorganización costosa y que consuma mucho tiempo, y permite responder rápidamente cuando cambien las circunstancias. Las ventajas de este paradigma, por tanto, incluyen mejoras en el flujo de la producción, una mayor eficiencia, una simplificación en control de la producción y mejoras en la calidad.

Si bien existen numerosos enfoques a la hora de tratar este tema, hay una serie de temas en los que inciden la mayoría de los investigadores:

- Estudios sobre la relación entre la distribución en planta y la forma en que las actividades de fabricación están organizadas y controladas. Aunque las células virtuales pueden considerarse como un concepto relacionado con la planificación y el control de la producción, que parten de una planta de fabricación dada, es importante destacar que las características de ésta pueden guiar hacia determinados sentidos la configuración del sistema. Por ello, la planta de producción sobre la que se trabaja será un atributo importante a la hora de analizar el problema.
- La importancia de los entornos de fabricación cambiantes y la adaptación del sistema productivo para combatir dichos cambios está presente en la mayor parte de las publicaciones. Los cambios realizados en el sistema productivo para alcanzar los nuevos requisitos del mercado, por definición no serán realizados a nivel de la planta del sistema productivo, sino a niveles estratégicos, tácticos y operacionales. Por tanto, un segundo atributo importante en el estudio de las células virtuales es la periodicidad con que éstas son redistribuidas.
- La formación de familias de productos para explotar sus similitudes para satisfacer los requisitos de fabricación, que constituye el aspecto central de la Tecnología de Grupos.

Como ya dijimos anteriormente, los recursos empleados podrán englobar máquinas, personas o equipos de traslado de material, y su inclusión conllevará que el diseño de las células sea más o menos complejo.

Cuando hablamos de la configuración física de estos sistemas productivos, deberemos tener en cuenta tres aspectos importantes (Drolet *et al.*, 1996):

- Variedad de estaciones de trabajo. El número de estaciones de trabajo diferentes dentro del sistema productivo depende de los requisitos

tecnológicos de los productos para los que el sistema es diseñado, y de la flexibilidad de éstas.

- Frecuencia de aparición de las estaciones de trabajo. El número de estaciones de trabajo de un cierto tipo dependerá de la demanda de los productos que tiene asociados, y proporcionará capacidad y flexibilidad para rutas alternativas.
- Distribución física de las estaciones de trabajo. De ella dependerá un factor tan importante como es el traslado de los materiales necesarios para el sistema productivo. Para que el sistema sea lo más eficiente posible, las estaciones de trabajo de un mismo tipo deberán estar dispuestas a lo largo de la planta de producción, de forma que exista flexibilidad en cuanto al número de rutas posibles, y las estaciones de trabajo deberán estar lo más cercanas posibles, de modo que no sea aceptable el almacenamiento de materiales. Por ello, habrá que tener muy presente la filosofía de trabajo JIT (Just In Time).

Para que la planta de los SFCV cumpla esta filosofía de fabricación, deberá existir una coordinación entre los proveedores que proporcionan las materias primas y los componentes que conformarán los productos, de forma que éstos lleguen a la fábrica en la cantidad y en el momento exacto en que son requeridos, con la máxima calidad, para que no se produzcan pérdidas innecesarias de rendimiento. Ello conllevará que los envíos de los proveedores tiendan a ser más frecuentes y disminuyan en tamaño. Además, para que los envíos se procesen de una forma óptima, deberán disponerse alrededor de la planta de producción instalaciones adecuadas desde las que recibir/expedir los productos. También existe la posibilidad de que los envíos de proveedores sean planificados para ser realizados en unas determinadas ventanas de tiempo, hacia células concretas. De esta forma, los proveedores de material pasarán a ser una extensión de las instalaciones del SFCV y su operación estará en armonía con éste.

Como es natural, un SFCV deberá crecer en cuanto aumente la demanda. Algo muy novedoso que aporta este paradigma de fabricación es que su eficiencia aumenta cuanto mayor es el tamaño de éste. Cuando crecen las instalaciones, aumenta el número de rutas alternativas mediante las que fabricar un producto, y por tanto, el sistema tendrá menos problemas ante los cambios en la funcionalidad (variedad) y capacidad (cantidad) de los productos demandados.

En estos sistemas jugarán un papel muy importante los sistemas que trasladan los materiales dentro de las células, siendo fundamental que aporten la suficiente flexibilidad. Estos sistemas pueden estar constituidos por personas, o

estar automatizados. Los sistemas automatizados están ganando una gran aceptación, y entre ellos podemos destacar los sistemas de guiado automatizados, controlados por infrarrojos o por radio, y la última generación de cintas transportadoras, constituidas por micro-interruptores, sensores de proximidad, lectores de códigos de barras y/o sistemas de visión, todos controlados por uno o varios controladores programables y un ordenador que hace las funciones de servidor. Es tal la importancia de estos sistemas, que en realidad serán los que limiten la aplicación de las células virtuales, dado que un mayor número de células llevará asociado un aumento en el traslado de materiales, que puede llegar a ser tan costoso que deje de convenir la aplicación de este paradigma (Pattanaik *et al.*, 2007).

Otra variante propuesta para paliar los inconvenientes de los sistemas de fabricación celulares clásicos, y relacionada con las anteriores, es el de las células de fabricación dinámicas. El paradigma de los Sistemas de Fabricación Celular Dinámicos (SFCD) puede aplicarse en el caso concreto de que las estaciones de trabajo que constituyen el sistema puedan moverse con una cierta facilidad. Estas estaciones de trabajo móviles ofrecen una gran flexibilidad, de forma que la configuración del sistema pueda ser modificada para satisfacer los requisitos durante un determinado período de tiempo, y puedan aplicarse los principios de la Teoría de Grupos (Rheault *et al.*, 1995).

Aunque todas estas estaciones de trabajo pueden ser trasladadas de sitio, el coste implicado en el traslado de algunas puede ser muy alto (ver Figura 23). Por ello, previamente deberá realizarse un estudio del sistema concreto, sus prestaciones y requisitos. En primer lugar, deberemos analizar los productos a fabricar, definiendo las familias de productos, el orden en que serán fabricados los productos de cada familia y la secuencia en la que éstas se fabricarán. Una vez hecho esto, deberá estudiarse con detalle la configuración del sistema, comparándose los costes de traslado de material en el caso de que agrupásemos las familias usando células virtuales, con el coste de recolocación de las estaciones de trabajo, en el caso de que usásemos células físicas. En base a estos costes, decidiremos qué tipo de células emplearemos, células físicas, o en caso de resultar demasiado caro, células virtuales. También existe la posibilidad de tener una configuración híbrida, que combine ambos tipos de células. Una vez decidida la configuración a adoptar, deberán planificarse las operaciones de los productos concretos a fabricar de cada familia. Estos sistemas deberán ser monitorizados de forma continua, de forma que cuando cambien los requisitos que se le plantean, pueda adecuarse a estos cambios de una forma estable.

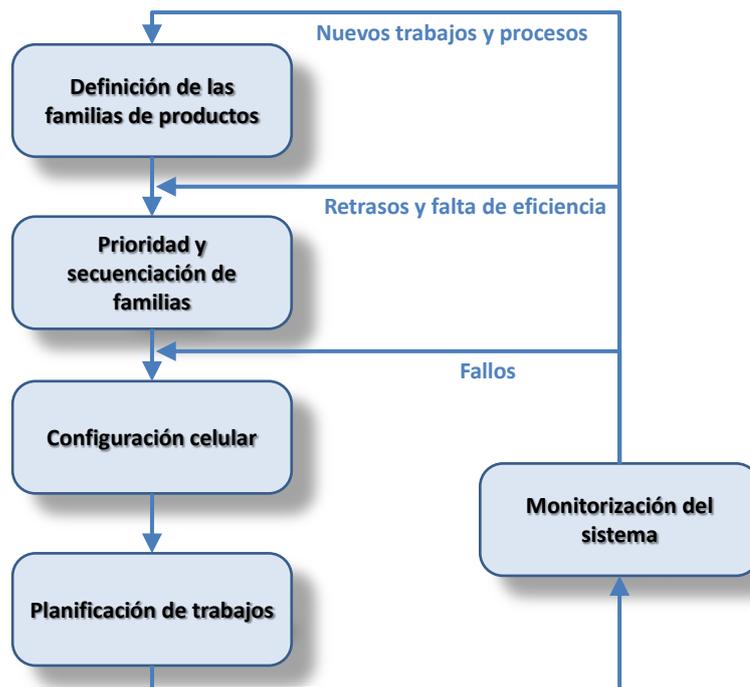


Figura 23: Marco de trabajo modular para un SFCD.

Tras haber hecho una revisión de los conceptos básicos de los SFC y de distintos paradigmas que han ido surgiendo para mejorarlos, mostraremos uno que ha resultado de especial interés para el desarrollo de nuestra investigación, ya que combina los SFC con el otro paradigma en el que nos hemos centrado: los Sistemas de Fabricación Reconfigurable Celular (SFRC).

### 2.3.3. Sistemas de Fabricación Reconfigurable Celular.

Como ya hemos explicado con detalle en el apartado anterior, la fabricación celular aporta una serie de ventajas significativas, pero sufre de una falta de flexibilidad, dado que no responde adecuadamente a cambios en la cantidad y variedad de la demanda de productos. Estas carencias impiden que estos sistemas sean capaces de resolver los desafíos que plantean los mercados actuales.

Una buena opción para permitir que los SFC adquieran una cierta adaptabilidad ante cambios, o reconfigurabilidad, durante el diseño de las células es el uso de máquinas modulares. Esto resultaría en un SFR en el que sus máquinas estarían dispuestas en células, es decir un Sistema de Fabricación Reconfigurable Celular (SFRC). Un SFRC aportaría una ventaja significativa a los SFR: la posibilidad de poder producir en paralelo, disminuyendo con ello el tiempo empleado en la fabricación de los productos de una forma significativa.

Dado lo novedoso de los SFR, sólo se dispone de una investigación que estudie la formación de células tradicionales en presencia de máquinas reconfigurables (Pattanaik *et al.*, 2007). En dicho artículo se plantea un método de agrupación de máquinas en células considerando que las máquinas son modulares, en base a dos objetivos: minimizar los movimientos entre células de los productos y los cambios de módulos necesarios según unas demandas establecidas. Es importante destacar que no tiene en cuenta ningún coste de operación, ni se asignan secuencias de operaciones a las células.

El modelo planteado en dicho artículo, considera, de una forma similar a las máquinas reconfigurables, que las máquinas están formadas por una serie de módulos (ver Figura 24):

- Los módulos básicos son estructurales, es decir, fijos a la máquina, tales como bases, columnas, tablas.
- Los módulos auxiliares son cinemáticos, es decir, implican movimiento, e incluyen ejes, cambiadores de herramientas, etc. Los módulos adecuados son seleccionados de una librería de módulos disponibles comercialmente para cada una de las funciones requeridas. Una combinación particular de diferentes módulos básicos y auxiliares proporcionan una habilidad particular a la máquina con lo que puede realizar una operación concreta.

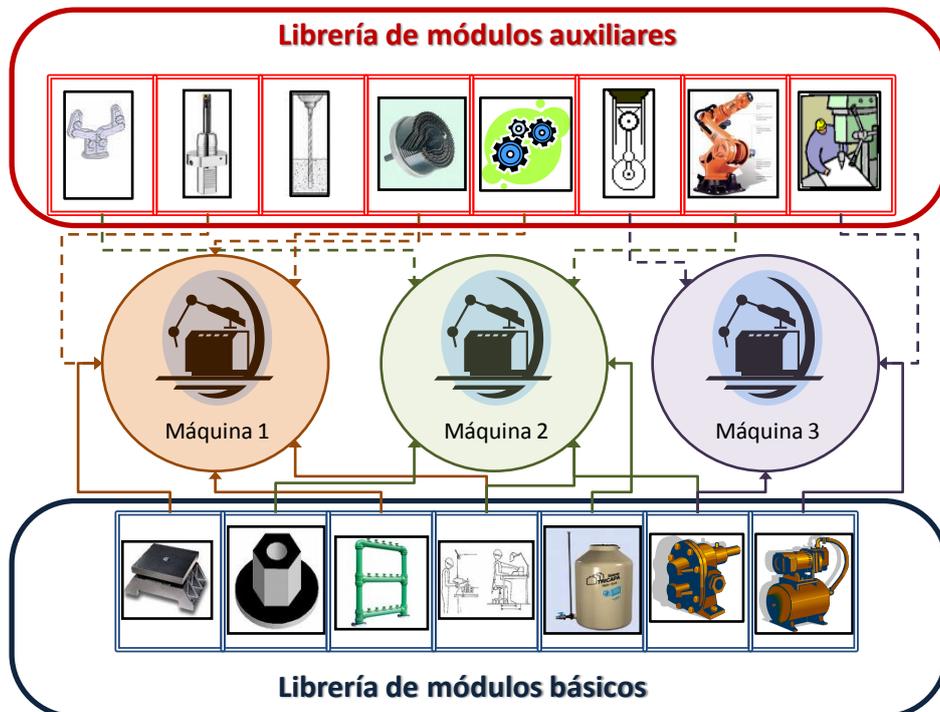


Figura 24: Librerías de módulos en máquinas reconfigurables.

Gracias al uso de máquinas modulares, podremos obtener un sistema de fabricación que logre de forma conjunta alcanzar los objetivos clásicos de un Sistema de Fabricación Celular junto a las características de un Sistema de Fabricación Reconfigurable. Como ya mencionamos anteriormente, un SFR está diseñado para permitir un cambio rápido en sus componentes hardware y software, de tal manera que pueda ajustar rápidamente la capacidad y funcionalidad de producción dentro de una familia de productos en respuesta a cambios repentinos en la demanda. Además, el uso de máquinas modulares permitirá combatir el envejecimiento y el desgaste producido en sistemas de producción dinámicos por naturaleza, permitiendo renovar o ampliar el sistema de forma económica mediante el simple cambio o inserción de módulos.

En los siguientes apartados mostraremos las distintas fases de las que consta la metodología de trabajo desarrollada por (Pattanaik *et al.*, 2007).

#### ***2.3.3.1. Aspectos previos a la formulación del problema.***

En primer lugar, se analiza el problema en su conjunto, y se definen una serie de matrices y factores que utilizará posteriormente en su modelo. Para ello, comienza analizando las máquinas que constituyen el sistema productivo, y las operaciones que podrá realizar cada una, mediante cambios en sus módulos auxiliares.

Gracias a ello, se define una matriz de compatibilidad máquina-operación, denominada MOCM (Machine-Operation Compatibility Matrix), constituida por unos factores comprendidos entre 0 y 1. Uno de estos factores, que relaciona a una máquina con una operación concreta, será nulo cuando la máquina no realice esa operación, y crecerá a medida que la máquina requiera un menor número de módulos auxiliares en la operación analizada.

Posteriormente, son definidas una serie de factores que caracterizan al sistema, muy relacionados entre sí. Estos factores son relativos a:

- La demanda relativa de cada producto. Gracias a este factor de demanda, podremos saber lo importante que es un producto dentro del sistema productivo, ya que es una medida del volumen de trabajo invertido en ese producto.
- El parecido existente entre cada par de operaciones realizadas de forma consecutiva, basándose en los factores de demanda de los productos implicados en esas operaciones. Un mayor factor de similitud entre dos

operaciones consecutivas implica que éstas son requeridas en la realización de un mayor número de productos. Obtener qué operaciones se parecen más entre sí, permitirá tener un criterio fiable a la hora de crear las células de máquinas, ya que serán agrupadas aquellas máquinas que realicen esas operaciones. Para obtener este factor de similitud, debemos analizar los planes de producción que pueden implementarse para fabricar cada producto, es decir todas las secuencias de operaciones mediante las que podremos obtenerlo.

- El parecido existente entre las máquinas del sistema productivo, basándose en los factores de similitud entre operaciones y en la compatibilidad máquina-operación de la matriz MOCM.
- La diversidad de operaciones existentes en cada máquina. Cuanto mayor es el número de operaciones distintas que un grupo de máquinas es capaz de llevar a cabo, mayor es su factor de diversidad operacional. Este factor nos dará una idea de lo autosuficiente que puede ser una célula, es decir, de la flexibilidad que posee para fabricar productos diferentes y por tanto, de lo necesarios que son, y si lo son, en qué medida, los movimientos intercelulares para poder completar la elaboración de un producto, dado que requieren de una operación que las máquinas pertenecientes a su célula no son capaces de realizar.

En segundo lugar, dada la complejidad del problema del diseño de células, realiza una serie de suposiciones que aplicará a su modelo. Éstas incluyen el hecho de que los planes de proceso son conocidos y fijos, los requisitos de los módulos y la información de la compatibilidad máquina-operación conocidos e inalterables, la distribución de demanda por tipos de piezas es determinística durante la formación de células y, finalmente, considera como dato el tamaño máximo de las células, es decir, el número máximo de máquinas que puede tener cada célula.

### ***2.3.3.2. Formulación del problema.***

El problema planteado por dicho artículo será encontrar la distribución de máquinas en células, de tal forma que sean optimizadas dos funciones objetivo, que emplearán los parámetros definidos anteriormente. Éstas buscarán la minimización de los movimientos intercelulares y del número de cambios de módulos auxiliares en el horizonte dado de productos, tomando como restricciones del problema el número máximo y mínimo de máquinas del que puede estar constituida cada célula. Esta formulación del problema no considera que exista una duplicación de máquinas para evitar los movimientos

intercelulares, ni los diferentes tiempos de procesamiento, traslado de material, etc.

La justificación de la elección de estas funciones objetivo está relacionada con la eficiencia del sistema productivo. Un menor número de cambios en los módulos auxiliares, logrado mediante la maximización de la similitud entre máquinas, permite que el proceso de fabricación tenga menos paradas, y por tanto, sea más eficiente y produzca un mayor volumen de productos. Por otra parte, disminuir el número de movimientos intercelulares, mediante la maximización de la diversidad de operaciones, es un objetivo de todo sistema celular, ya que el hecho de que las células sean lo más independientes posibles permitirá que no se produzcan esperas que disminuirán la eficiencia del sistema, relativas al traslado de material, a que esté lista la máquina necesaria de la otra célula, etc.

El problema reside en que ambos objetivos entran en conflicto. Si lo analizamos con un poco más de detalle, podemos ver que minimizar los movimientos intercelulares implica que las células sean lo más independientes posible entre sí, para lo que deberán realizar una mayor diversidad de operaciones. Pero, para que puedan realizar una mayor variedad de operaciones, será necesario un mayor número de cambios en los módulos auxiliares. Por ello, deberemos llegar a una solución que cumpla lo mejor posible con ambos objetivos.

#### ***2.3.3.3. Determinación de método de resolución.***

Tras enumerar brevemente métodos de resolución aplicables a este problema, y sus inconvenientes, (Pattanaik *et al.*, 2007) elige el método que considera más adecuado para identificar las células de máquinas, optimizando las funciones objetivo anteriormente mostradas. Éste resultó ser un algoritmo genético multi-objetivo, denominado NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm).

#### ***2.3.3.4. Validación del algoritmo.***

La configuración de células resultante es simulada para encontrar el número exacto de movimientos intercelulares y de cambios en módulos auxiliares, de forma que sea validado el algoritmo.