

24 de Julio de 2011



RESUMEN

ROBOTS EN LA FABRICACIÓN
TÍTULO ORIGINAL: ROBOTS IN MANUFACTURING
REALIZACIÓN EN UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE VIENA

Carlos Sanz Monge

Ingeniería Industrial

ÍNDICE

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2. FABRICACIÓN INTEGRADA POR ORDENADOR (CIM)	3
2.1. FRABRICACIÓN ASISTIDA POR ORDENADOR (CAM)	4
2.2. DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR (CAD)	4
2.3. INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR (CAE)	5
2.3.1. Control Numérico Computarizado (CNC)	5
2.3.2. Método de Elementos Finitos (FEM)	5
2.3.3. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	6
2.4. PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ASISTIDA POR ORDENADOR (CAP)	6
2.5. CONTROL DE CALIDAD ASISTIDO POR ORDENADOR (CAQ)	7
3. SISTEMAS DE FABRICACIÓN INTELIGENTE	7
3.1. SOFTWARE AGENTE	8
3.2. NECESIDADES DE RED	9
3.3. MODELOS ORGANIZACIONALES	9
3.3.1. Sistema de Fabricación Holónico (HMS)	10
3.3.2. Nuevos enfoques de sistemas IMS	10
- Sistema de Fabricación Fractal (FMS)	11
- Sistema de Fabricación Biónico (BMS)	12

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La fabricación es un tema extenso, así como lo es el rol de los robots en la misma. De forma general llamamos fabricación a la práctica que utiliza máquinas, herramientas y mano de obra humana para producir bienes para su uso, tratamiento posterior o venta. Para la comprensión de las motivaciones de este documento ha de tenerse en cuenta que la fabricación también cubre todo proceso, sea o no productivo, que tiene influencia en la producción. Cada movimiento de material, tarea de control e, incluso, planificación y distribución en planta tienen efectos en el ciclo de fabricación, principalmente sobre el tiempo del mismo, tan decisivos o más que los más básicos de esta práctica: la modificación efectiva de la pieza de trabajo.

Actualmente, como efecto de la alta competitividad nacional e internacional en el mercado las compañías necesitan disminuir al máximo sus tiempos de producción. También son muy característicos de la situación actual en la fabricación los continuos cambios que se le exigen a los sistemas de producción para asistir a una demanda muy variante. Se tiende a la generación de objetos de consumo de gran calidad y vida útil cada vez menor. Es imperativo conseguir un funcionamiento de planta que permita una ágil adaptación de su estructuración optimizando los recursos y consiguiendo un proceso rápido y lo menos susceptible al cambio posible. Para poder adoptar estas premisas con una competitividad líder es necesario el empleo de la tecnología más avanzada. Los grandes avances en comunicación entre robots que manejan las máquinas-herramientas son, en la fabricación de hoy, los principales puntos de diferenciación y el principal tema a ser tratado en este documento.

2. FABRICACIÓN INTEGRADA POR ORDENADOR (CIM)

Los importantes avances en las tecnologías de fabricación, unidas a los controles por ordenador, han llevado a sistemas totalmente gobernados por sistemas automáticos, en los cuales, una vez su trabajo es inicializado y optimizado, la participación humana se ve casi extinta. Esta es la forma de conseguir un proceso de producción enteramente computarizado (CIM).

El objetivo de la Fabricación Integrada por Ordenador es maximizar la eficiencia de cada proceso, disminuyendo los tiempos individualmente de cada uno apoyándose en el crecimiento de la automatización y mejorando las comunicaciones entre los mismos, con el fin de evitar o disminuir al máximo errores y averías. Típicamente se emplean para ello procesos de control en circuito cerrado basados en tratamiento de información en tiempo real proveniente de diversos sensores y captadores.

En todo proceso industrial es decisiva la eficiencia. Esto incluye la aspiración de reducir costes, que principalmente se traduce en reducir tiempos de los procesos. Hoy en día esto implica aprovechar las posibilidades que ofrecen los sistemas CIM para satisfacer la extendida filosofía de producción *just in time*. Se trata, en resumidas cuentas, de utilizar células de fabricación flexible y operaciones automatizadas como en la alimentación de las máquinas o en el mantenimiento. Si partiésemos de un ejemplo de fabricación totalmente manual, podríamos establecer una media de tiempo real de transformación de sólo el 5% total del ciclo, correspondiendo el 95% complementario a operaciones de mantenimiento y movimientos de transporte y almacenaje.

La fabricación integrada por ordenador (CIM) envuelve conceptos tratados y analizados individualmente que, mediante su integración, hacen posible esta tecnología. Son los siguientes:

CIM:

- **CAM** – Fabricación Asistida por Ordenador.
- **CAD** – Diseño Asistido por Ordenador.
- **CAE** – Ingeniería Asistida por Ordenador.
- **CAP** – Planificación de la producción Asistida por Ordenador.
- **CAQ** – Control de calidad Asistido por Ordenador.

2.1. FABRICACIÓN ASISTIDA POR ORDENADOR (CAM)

Este concepto se basa en el uso de determinado software para el control de máquinas-herramienta y maquinaria relacionada en el mecanizado y conformado de piezas. Es una etapa de la asistencia por ordenador muy influenciada por el diseño (CAD) y la ingeniería (CAE) empleados. Los modelos generados CAD y verificados mediante técnicas CAE sirven de entrada al software CAM que controla las máquinas-herramienta en el procesado de la forma y propiedades de la pieza. Estas máquinas empleadas se basan en Control Numérico (NC) o Control Numérico Computarizado (CNC). Ambas trabajan con coordenadas aportadas por el sistema y definidas en los diseños CAD. Utilizan técnicas de interpolación para definir el movimiento de la herramienta.

2.2. DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR (CAD)

El diseño es posible con software específico que permite la generación del dibujo y la comprobación de estructura y mecanismo, verificando restricciones geométricas y cinemáticas con simulaciones de colisión e interferencia. Un archivo CAD debe contener información de materiales, dimensiones, tolerancias y procesos. Un diseño eficiente es clave para reducir problemas y tiempos durante la fabricación por lo que se convierte en una etapa clave de la fabricación. Ha de ser un diseño capaz de ser almacenado en un ordenador y fácilmente leído y comprendido por una máquina CNC para convertir esa pieza virtual en una material.

2.3. INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR (CAE)

Estos métodos incluyen la gran cantidad de software que hace posible la realización de análisis y simulaciones, tanto de maquinaria como de piezas, de los procesos de fabricación. Este concepto engloba muy diferentes tecnologías, por ejemplo el Control Numérico (NC) que maneja los procesos de fabricación, los Métodos de Elementos Finitos (FEM) que permiten analizar comportamientos estáticos y dinámicos, la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) como herramienta de simulación de flujos y el Prototipado Rápido (RP).

Habitualmente la tecnología CAE se utiliza de manera iterativa hasta conseguir unos resultados fiables y aceptables para el diseño creado.

2.3.1. Control Numérico Computarizado (CNC)

Es el control con el cual las funciones de la máquina-herramienta son controladas por un programa que contiene un código alfanumérico. La máquina puede controlar el movimiento de la pieza o de la herramienta con parámetros de entrada como la alimentación, profundidad de corte, velocidad de avance y de corte, giros, etc.

Como la tecnología bien asentada que es, sus aplicaciones cubren la mayoría de los campos de la fabricación, incluyendo mecanizado y conformado sin arranque de viruta. Se emplean máquinas-herramienta altamente automatizadas como centros de torneado o de mecanizado, capaces de realizar sin maniobras humanas el cambio de herramientas de corte bajo el control numérico computarizado, tomando una parte esencial de los sistemas integrados de fabricación.

Algunas de sus limitaciones son el alto coste, su mantenimiento y la necesidad de un programador experto. En oposición, se caracterizan por una alta precisión, versatilidad, cortos tiempos de maniobra y gran flexibilidad.

2.3.2. Método de Elementos Finitos (FEM)

Se trata de métodos de análisis numéricos empleados para obtener soluciones aproximadas en una gran variedad de problemas ingenieriles. Aunque se diseñó inicialmente con el fin de estudiar tensiones en estructuras complejas de fuselaje, se ha extendido a aplicaciones de todo tipo en la mecánica de medios continuos.

En la mayoría de los problemas ingenieriles se puede ver que con las ecuaciones que gobiernan el comportamiento y condiciones de frontera no pueden resolverse analíticamente. Ahora que el poder computacional a nuestro alcance es notable, una alternativa viable es retener la complejidad del problema y hallar una solución numérica aproximada.

Un análisis numérico común para geometrías sencillas es el de diferencias finitas, en el que se genera un modelo en el que con las ecuaciones de gobierno se resuelven para puntos definidos por una malla situados de manera equidistante entre sí. Su precisión es mayor según lo sea el número de elementos de la malla. Cuando la geometría de la pieza es más compleja se emplea el

Método de Elementos Finitos (FEM), que genera un mallado que transforma la pieza en un ensamblaje de elementos discretos con muchos más puntos en la zona de la complejidad. Puede usarse para representar formas extremadamente complejas.

2.3.3. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Esta tecnología utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas de flujos. Se emplea la potencia computacional actual para calcular simulaciones de interacción entre líquidos y gases con condiciones de frontera determinadas en escenarios complejos como flujos transitorios y turbulentos. La validación de tal software se realiza comparando los resultados obtenidos con ensayos de vuelo en túneles de viento.

Las bases de casi todos los problemas CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, que definen cada fase del flujo fluido. Estas ecuaciones pueden simplificarse removiendo términos mediante la descripción de la viscosidad dando lugar a las ecuaciones de Euler y mediante la descripción de vorticidad presentando las ecuaciones de potencial completas. Finalmente, se obtienen las ecuaciones de potencial linealizadas. Actualmente, con los cada vez más potentes recursos computacionales, los métodos tridimensionales o Simulaciones Numéricas Directas (DNS) están tomando una gran importancia para simular de manera muy realista los procesos fluidos.

2.4. PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ASISTIDA POR ORDENADOR (CAP)

Se utiliza para desarrollar un plan de fabricación basado en la proyección de variables como costes, tiempos de maniobra, recursos de maquinaria y material, volúmenes de producción, posibles rutas de sustitución de material y/o prueba de requisitos.

El problema de planificación de procesos surge como una rígida estructura jerárquica de tareas donde las de bajo nivel están bien definidas, como la determinación de los parámetros de la máquina y la operación, mientras que las de los niveles más altos (de control) coordinan y manejan todo el sistema. Esta coordinación de arriba-abajo lo convierte en toma de decisiones muy estrechamente acoplada. La complejidad de un sistema CIM con estructuras jerárquicas crece rápidamente con el tamaño del mismo, haciéndolo muy caro. De la misma manera, asimilar la gran cantidad de variables para la planificación de actividades es un obstáculo importante. Para afrontar estos problemas se emplean sistemas CAP, buscando automatizar en la medida de lo posible estas tareas de planificación. La planificación manual está limitada a la experiencia personal y conocimientos del autor, siendo además lenta, tanto en su creación como modificación. Por tanto, el modelo CAP se convierte en una parte esencial de inteligencia en la fabricación. Algunos de sus beneficios son:

- Racionalización y estandarización del proceso.
- Aumento de la productividad.
- Reducción de tiempos de maniobra.
- Mejora de legibilidad.
- Incorporación de nuevas aplicaciones.

2.5. CONTROL DE CALIDAD ASISTIDO POR ORDENADOR (CAQ)

Para una empresa de fabricación es la poderosa arma estratégica en la competición por el mercado y el éxito, siendo clave para la supervivencia y los beneficios de la compañía. Un sistema CAQ puede, de manera efectiva, recopilar, almacenar, analizar y evaluar información y datos de calidad de toda la producción y administración de la empresa utilizando todo tipo de recursos para obtener supervisión, administración y garantía de calidad de los productos y del trabajo. Para ello debe ser un sistema que supervise y evalúe la cadena completa de investigación de mercado, diseño y desarrollo del producto, producción, comprobación e incluso actividad económica.

Las funciones de calidad en fabricación se pueden dividir en técnicas y de producción. Las técnicas pertenecen a la preparación del trabajo previo a la producción. Las de producción se centran en los procedimientos de trabajo y calidad del producto. Los procedimientos de trabajo suponen la parte más importante de la fabricación y los que determinan la calidad final del producto y su control es la base del control de calidad. Implica el control adecuado de las condiciones de entrada de la materia prima, del desarrollo del proceso y de las piezas a la salida.

3. SISTEMAS DE FABRICACIÓN INTELIGENTES (IMS)

En el sector de la fabricación se están dando unos cambios específicos que llevan a términos de mayor exigencia. Los clientes participan de forma creciente en los procesos de producción a través de especificaciones personales concretas y demanda de productos de alta calidad en lotes pequeños y tiempos de entrega bajos, lo que define la filosofía moderna del sector: *just in time*. Los sistemas clásicos quedan obsoletos desde su concepción para grandes tamaños de lote y reducida variedad. Para mejorar la competitividad, no es aceptable adaptar los viejos sistemas a las nuevas demandas, pues funcionarían con una eficiencia muy baja. Se hace ahora imprescindible diseñar sistemas fácilmente reconfigurables y robustos ante perturbaciones, mediante el empleo de estructuras modulares, interfaces eléctrica y mecánicamente estandarizadas y de control abierto, que supongan una fácil y rápida inicialización.

Los sistemas CIM, están ideados para afrontar toda esta nueva problemática, pero lo hace mediante un control jerárquico que, aunque centralizado, se desarrolla de forma secuencial. Estos sistemas implican inversiones elevadas, largos tiempos de maniobra y estructuras complejas que nos pueden llevar de vuelta a sistemas rígidos. La pérdida de flexibilidad y capacidades de reconfiguración en ambientes dinámicos son algunos de los aspectos que dan problemas al progreso de las empresas, suponiendo siempre un pequeño cambio nuevos y altos costes de inversión.

Para resolver estas dificultades se han ido proponiendo nuevos conceptos diferentes desde su concepción. La fabricación fractal, biónica y holónica son tres de ellos frecuentemente mencionados y estudiados como la nueva generación de sistemas de fabricación. Integran capacidades de flexibilidad, adaptabilidad y, de manera pionera, se busca que se basen en el concepto de inteligencia dentro de la automatización.

Para conseguir un control inteligente han de usarse dispositivos basados en software “agente”. Esto implica el uso de *mecatronics* inteligentes capaces de comunicarse al mismo nivel y suponer su propio control y supervisión. Así con el uso de software basado en “multi-agente” funciones inteligentes de control de cada agente trabajan cooperativamente para conseguir el objetivo común.

Estos sistemas inteligentes de fabricación pueden explicarse mediante la introducción de los “agentes”, las necesidades de redes de comunicaciones y la distribución de los modelos. Así se desarrolla en el documento al cual este resumen se refiere.

3.1. SOFTWARE AGENTE

Desde el punto de vista lógico de los Sistemas de Fabricación Distribuidos (DMS), un agente es una entidad de software con las siguientes características:

- autonomía;
- capacidad de representar recursos físicos (ej. robots);
- capacidad de representar objetos lógicos (ej. Órdenes, planes...);
- inteligencia para tomar decisiones propias y actuar hacia sus objetivos (planificación de procesos, distribución de tiempos...)
- capacidad de interactuar con otros agentes (también con humanos) y cooperar ante la falta de datos o habilidades para alcanzar los objetivos;
- capacidad de interactuar en el contexto en el que está insertado adaptándolo a sus conocimientos;
- capacidad de reaccionar ante incentivos y definir planes de actuación;
- capacidad de decidir la viabilidad y conveniencia de peticiones de otros agentes;
- capacidad de adquirir y memorizar nuevos conocimientos.

Existen diferentes características sobre las que se distingue para clasificar los agentes. Según su movilidad pueden ser estáticos, si son introducidos en una máquina u otro recurso, o móviles, moviéndose por un entorno como una red. Según la capacidad de decisión pueden ser deliberativos, cuando poseen un modelo de razonamiento y capacidad de tomar sus propias decisiones o negociar con otros agentes, o reactivos, si sólo pueden actuar en consecuencia a estímulos externos provenientes de otros agentes. Los agentes de información o de internet son los que controlan y administran los grandes flujos de datos. Existen agentes híbridos que combinan dos o más características de las clasificaciones. También se pueden catalogar según la combinación de tres características que exhiban principalmente (1: cooperación, 2: aprendizaje y 3: autonomía) en cuatro tipos: colaborativo (1 y 3), colaborativos de aprendizaje (1 y 2), de interfaz (2 y 3) e inteligentes (1, 2 y 3).

Algunas características propias y entre entidades en los modelos organizacionales DMS, como autonomía, cooperación, flexibilidad, adaptabilidad, inteligencia, etc.; son fundamentales para crear sistemas envolventes con agentes autónomos trabajando juntos. Muchos y diferentes de estos agentes componen los Sistemas Multi-Agente (MAS) y así lograr el potencial para alcanzar los objetivos, mediante toma de decisiones cooperativa o convencional (con un agente maestro y

varios esclavos sin comunicación entre sí). Para que un sistema MAS sea implantable han de elegirse minuciosamente los protocolos de comunicación, cooperación y negociación usando estándares que permitan la interacción.

3.2. NECESIDADES DE RED

Los sistemas actuales de fabricación están compuestos por dispositivos especializados acoplados mediante redes cerradas (privadas de la empresa). La coordinación entre ellos la realizan sistemas centrales de manera jerárquica. En las aplicaciones industriales se utilizan controladores lógicos programables (PLC) como intermediarios para escanear el estado de sensores y actuadores y enviar las órdenes pertinentes. Los PLC no son necesarios en sistemas IMS ya que los sensores y actuadores inteligentes se comunican directamente y en tiempo real.

Internet es una forma muy prometedora de interconectar los diversos dispositivos inteligentes. Es barata y está en constante mejora. A niveles bajos de comunicaciones ISO, Ethernet está reemplazando los tradicionales buses de campo, ganando muchos seguidores las redes locales, tanto cableadas (LAN) como inalámbricas (WLAN). Especialmente las redes inalámbricas han supuesto una importante revolución eliminando tareas como recableado y facilitando enormemente otras como la instalación de nuevos dispositivos.

El proyecto SIRENA (Infraestructura de Servicio para Aplicaciones con Redes Integradas en Tiempo Real) forma parte de una investigación a nivel europeo para el desarrollo de aplicaciones distribuidas en diversos entornos computacionales integrados a tiempo real, como por ejemplo la automatización industrial o un sistema dogmótico. Su visión pretende sustituir las arquitecturas tradicionales maestro-esclavo por nuevas conexiones basadas en la Arquitectura Orientada al Servicio (SOA) y la tecnología de Servicios Web (WS), utilizando además el lenguaje XML de los servicios web para estandarizar formatos de datos.

3.3. MODELOS ORGANIZACIONALES

Como modelo implementado de control en los sistemas CIM el control jerárquico es fácil de entender y menos redundante que otras arquitecturas de control distribuido, pero tiene un claro punto débil, el que hace que un pequeño cambio en un nivel puede ser significativamente adverso para otros niveles de la jerarquía. Por ello es mucho más adecuado para producción en un entorno estacionario que en uno dinámico por el problema que supone aplicar continuos cambios de control en la jerarquía de un equipo. Claramente, los sistemas de fabricación del futuro deberían ser flexibles y fácilmente reconfigurables y adaptables a un ambiente dinámico. Además debería ser inteligente, autóctono y distribuido, compuesto por módulos funcionales independientes. Para afrontar estos requisitos se proponen nuevos paradigmas en la fabricación como son el Sistema de Fabricación Biónico (BMS), el Sistema de Fabricación Holónico (HMS) y el Sistema de Fabricación Fractal (FMS).

3.3.1. Sistema de Fabricación Holónico (HMS)

La teoría de la fabricación Holónica surgió del híbrido entre las definiciones de estructura individual de los organismos vivos (*Holos*: “todo” en griego) y ellos como parte de grupos sociales (sufijo *on*: “parte”), dando lugar al término Holón. Así se define un Holón como un bloque de construcción autónomo y cooperativo en un sistema para transformación, transporte, almacenaje y/o validación de información y objeto físico. El holón consiste en una parte de procesado de información y, a menudo, una parte física. Un holón puede también ser parte de otro holón. De esta forma, un sistema de holones que pueden operar para conseguir un objetivo se llama Holarquía, que define las reglas básicas y estrategias de cooperación entre holones. Un holón puede formar parte de varias holarquías y, a su vez, es una en sí mismo. Si una holarquía integra todo el rango de actividades de la fabricación, desde la reserva hasta el diseño, producción y marketing, se denomina Sistema de fabricación Holónico (HMS).

El concepto HMS combina las mejores características de las estructuras organizacionales jerarquía (“de arriba a abajo”) y heterarquía (“de abajo a arriba”, “cooperativo”). Puede preservar la estabilidad de la jerarquía proviniendo la flexibilidad de la heterarquía.

La principal tarea para el diseño de un sistema HMS es la identificación de los holones. Se tiende a distinguir holones de producto y de recurso como holones locales y holones de gestión. Así, la estructura holónica se trata como un sistema producto/recurso enfocado a la gestión de la fabricación. Sin importar el tipo de holón, cada uno tiene dos funciones básicas, la realizar la secuencia de operaciones y controlar el tiempo de ejecución. Los holones de gestión procuran obtener una secuencia óptima de tareas para mandar las instrucciones adecuadas a los diferentes holones locales. Este proceso implica un comportamiento pro-activo del sistema y es el más apropiado cuando se aplican modificaciones (funcionamiento jerárquico). Contra sucesos inesperados, el holón de gestión necesita bastante tiempo para obtener una secuencia nueva por lo que, si se espera una reacción rápida, los holones locales deben ser los encargados de buscar una solución acorde a sus criterios locales de forma cooperativa e ignorando la voluntad de los de gestión, suponiendo un comportamiento reactivo (funcionamiento heterárquico). De esta manera, las relaciones entre holones son flexibles y el sistema se controla de manera autónoma.

Se han probado posibles aplicaciones para sistemas holónicos en mecanizado, ensamblaje, transporte y fabricación continua. Por ejemplo, los aspectos operacionales se exploran para planificar un grupo de holones en un entorno de células de producción y robots con control distribuido. Se proponen también aplicaciones para sistemas robóticos flexibles y reconfigurables.

3.3.2. Nuevos enfoques de sistemas IMS

Los dos sistemas de este apartado, los sistemas de fabricación Fractal y Biónico no se emplean aún como sistemas en la industria, a pesar de tener más de veinte años desde su concepción. Siguen siendo propuestas a desarrollar.

- Sistema de Fabricación Fractal (FMS)

El concepto fractal tiene su origen en las matemáticas y la teoría del caos. Se basa en el concepto de multi-agente con cooperación autónoma. La unidad fractal básica (BFU) consiste en cinco módulos funcionales: observador, analizador, solucionador, organizador e informador. El modelo de arquitectura fractal representa una estructura jerárquica construida por los elementos de una BFU y el diseño de la unidad básica incorpora un grupo de atributos pertinentes que pueden representar completamente cualquier nivel de la jerarquía. Es decir, el término fractal puede representar un sistema entero de fabricación al más alto nivel o una máquina física al nivel inferior. Cada BFU proporciona servicios de acuerdo con un objetivo a nivel individual y actúa independientemente mientras trata de conseguir el fin de todo el sistema. Aunque se cumpla el fin global de del sistema, la coherencia de objetivos debe mantenerse mediante cooperación e interacción entre unidades. En un sistema FMS no existe organización predefinida. Cada BFU tiene sus propios recursos con capacidades estáticas y un sistema de información eficiente que provee los datos requeridos para la producción y asigna los recursos para el proceso. Estas características permiten un entorno muy dinámico dentro de la unidad, lo que hace posible el trabajo con constantes cambios en la estructura de la empresa y una rápida reacción ante requisitos externos.

Las características que diferencian un sistema FMS de otros son: auto-similitud, auto-organización y orientación al objetivo. Especialmente es el Proceso de Reestructuración Dinámico (DRP), parte de la auto-organización, la característica más distintiva.

Auto-similitud: se refiere, no sólo a las características estructurales, sino también a la manera de actuación y a la formulación de los objetivos. Aunque existan varios componentes con el mismo objetivo, las condiciones y situaciones pueden ser diferentes. Puede ocurrir en fractales con idénticos fines, mientras que las variables de sus entradas y salidas tienen estructuras internas completamente diferentes. Si dos fractales dan las mismas salidas para las mismas entradas se llaman auto-similares aún con estructuras internas completamente diferentes. Un fractal diseñado en un nivel puede ser aplicado a otros niveles por este motivo.

Auto-organización: a nivel matemático se refiere a la “auto-optimización” para, mediante las aproximaciones numéricas adecuadas optimiza el comportamiento del fractal en el sistema. A nivel operacional, el proceso de reestructuración dinámica (DRP) apoya la reorganización de las conexiones a la red entre fractales de manera que el sistema FMS pueda ser optimizado y adaptado al entorno dinámico. El DRP modifica continuamente la estructura de todo el sistema dependiendo de los fines de los fractales y de las condiciones externas. Ante una perturbación, los controladores se cambian y/o reorganizan automática y dinámicamente con una pequeña intervención humana usando el DRP. El Agente de Reestructuración (REA) se encarga de controlarlo decidiendo la actuación basándose en evaluaciones periódicas de un fractal y utilizando el Agente de Toma de Decisiones (DMA) sin necesita negociar con otros fractales o comunicándose con el Gestor de Estado de Fractal (FSM) si el sistema necesita más controladores.

Orientación al objetivo: la coherencia de los objetivos de todos los fractales ha de mantenerse al implementar un fin a cualquier nivel. Los sistemas FMS desarrollan los objetivos automáticamente para armonizar el sistema resolviendo conflictos. El cambio de un objetivo a alto nivel supone grandes cambios en sub-fractales y, para ello, el sistema les permite negociar en cualquier momento.

- Sistema de Fabricación Biónico (BMS)

El concepto viene de la hibridación entre biológico y electrónico mediante la aplicación de métodos y sistemas de la naturaleza a los tecnológicos. Un sistema biológico exhibe muchas características envidiables, incluyendo autonomía, comportamiento espontáneo y armonía social entre relaciones jerárquicas. Estructuralmente, la célula es la unidad básica que abarca todas las demás partes de un sistema biológico, siendo básicamente similares, pero diferenciadas por la función, y son capaces de múltiples operaciones.

Las estructuras y comportamientos observados en los seres vivos, desde el nivel celular hasta el ser en cuestión, es aplicable a las empresas. Así, en un sistema BMS unidades básicas se llaman células de producción.

Las unidades de fabricación obtienen las entradas del entorno en la planta de fabricación y desarrollan operaciones. Las salidas vuelven al entorno. Como las encimas en los sistemas biológicos, los elementos coordinadores pueden actuar para preservar la armonía. También programas de regulación similares a las hormonas pueden incluir políticas o estrategias que tienen efectos a largo plazo en el entorno. Incluso un control centralizado se puede aplicar para reaccionar urgentemente ante ciertas contingencias. Además, las unidades de fabricación pueden actuar de manera similar a las células como bloques de construcción para generar estructuras de control jerárquico. En éstas, cada capa de la jerarquía soporta y es soportada por las adyacentes. Una especificación aportada a la capa superior pasa de una en una hasta convertirse en tarea. En sentido contrario, procesos “de abajo a arriba”, las acciones de las unidades se acumulan y manifiestan en todo el sistema de producción.

La teoría BMS empieza con su elemento básico llamado “modelon” que se compone de modelones (submodelones) formando la estructura jerárquica. Las comunicaciones aseguran el correcto intercambio de información interior y entre unidades. La propagación de la misma requiere hacerse mediante un proceso “auto-organizado”, donde los modelones de los niveles superiores pasan información (de forma inspirada en la información del ADN) a los de niveles inferiores, capa a capa.

Las unidades de supervisión y operación (similares a las encimas) tienen la responsabilidad de regular en control de las interacciones entre modelones emparentados. Imponen reglas estructurales y organizacionales para que ejecuten tareas y consigan los objetivos de todo el sistema con cooperación.

Las unidades de producción (células de trabajo) se insertan en la empresa como recursos productivos con distintas capacidades pero, cooperando, pueden alcanzar el fin global de la unidad cambiando sus estados si es necesario. El material en bruto y control de la información circulan en caminos predefinidos. El material procesado y la información será enviada de nuevo por las interfaces correspondientes al entorno donde se redirigen a su próximo destino (otra célula de trabajo, almacenaje...). Las unidades de coordinación y supervisión tienen la gestión del trabajo entre elementos de una célula y entre células en los sistemas de fabricación.