

TEMA 4: TECNOLOGÍAS DE PROCESO

**Esteban Fernández Sánchez
Lucía Avella Camarero
Marta Fernández Barcala
20006**

1. Introducción
 2. Automatización de los sistemas productivos
 - 2.1. Flexibilidad
 3. Principales técnicas de automatización
 - 3.1. Robots
 - 3.2. Control numérico por ordenador
 - 3.3. Sistemas automatizados de manejo de materiales
 - 3.4. Sistemas de fabricación flexible
 - 3.5. Diseño, fabricación e ingeniería asistidos por ordenador
 - 3.6. Tecnología de grupo
 4. Implicaciones estratégicas y organizativas de la automatización de los sistemas productivos
 - 4.1. Puesta en práctica de la automatización
 - 4.2. Barreras a la automatización
- Anexo: Inteligencia artificial

1. INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo de este libro, dedicado al análisis de la función de producción, se han analizado los diferentes tipos de sistemas productivos: Es decir, las diferentes tecnologías de producción aplicables en las empresas. El objetivo de este capítulo es analizar la aplicación de las nuevas tecnologías de la información en las empresas y, de esta forma, completar los aspectos relacionados con las decisiones de carácter estructural relativas a las tecnologías de producción.

Con este fin, se analiza en qué consiste la automatización de los sistemas productivos y la razón por la que las empresas acuden a esta alternativa: lograr gran flexibilidad sin incurrir en altos costes de fabricación. Asimismo, se describen las principales técnicas de automatización aplicables en las fábricas: robots, control numérico por ordenador, sistemas automatizados de manejo de materiales, sistemas de fabricación flexible, diseño, fabricación e ingeniería asistidos por ordenador y tecnología de grupo. Por último, se analizan las implicaciones estratégicas y organizativas derivadas de la automatización de los sistemas productivos. El anexo de este capítulo se dedica al análisis de la inteligencia artificial.

2. AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

Con el fin de sobrevivir en sectores industriales caracterizados por continuas innovaciones, una intensa rivalidad competitiva y clientes refinados que demandan productos personalizados, es necesario utilizar sistemas productivos que sean capaces de fabricar a costes bajos (eficiencia) una amplia variedad de productos (flexibilidad).

Una forma¹ de alcanzar los objetivos de eficiencia y de flexibilidad, considerados antagónicos en las fábricas convencionales, consiste en aplicar las modernas tecnologías de la información² en los procesos productivos, dando lugar, así, a la automatización. La tecnología de fabricación avanzada (*Advanced Manufacturing Technology*, AMT) o automatización consiste en utilizar los ordenadores y la informática para dirigir y controlar las actividades de transformación que llevan a cabo las máquinas.

La aplicación del ordenador en la industria proporciona dos posibilidades nuevas a la fabricación. En primer lugar, la utilización de programas (*software*) variables y de acceso directo con objeto de lograr la optimización continua del proceso. La automatización se apoya en el principio de retroalimentación y permite modificar el output del proceso sin tener que cambiar los factores de producción. Basta, por ejemplo, cambiar las instrucciones programadas que guían

¹ La producción *just in time* permite igualmente superar la incompatibilidad entre flexibilidad y eficiencia. No obstante, las nuevas tecnologías de la información también son aplicables a este sistema productivo. De hecho, Japón –‘cuna’ de la producción Just in Time– es el país que cuenta con mayor número de robots aplicados a la industria.

² La denominación de tecnologías de la información designa una amplia categoría de tecnologías que tienen como rasgo común la utilización del circuito microelectrónico de silicio y que se dedican a la elaboración, manipulación y presentación de datos, lo que afecta especialmente a las actividades de comunicación, cálculo y control (Mansfield, 1984).

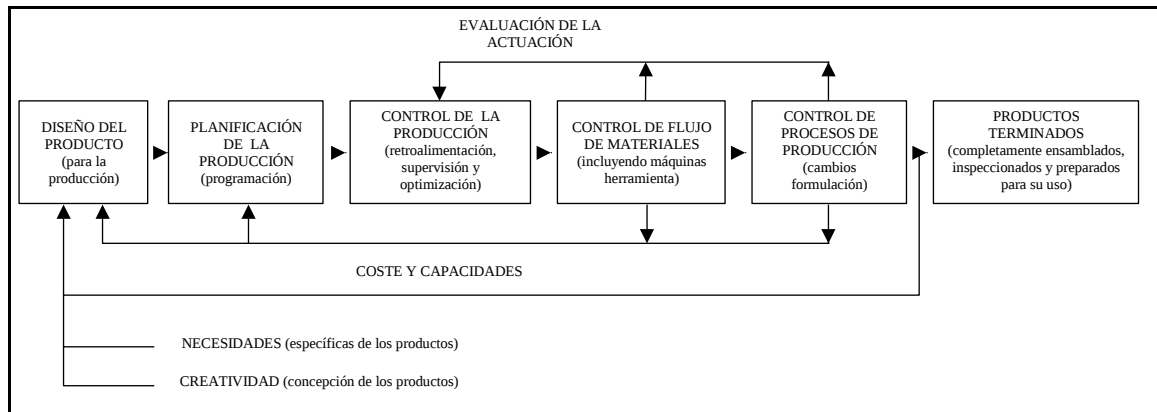
las distintas máquinas para producir una variedad de piezas o componentes de distintas formas y tamaños, dentro de una amplia gama predeterminada por el programa en uso. La secuencia de las tareas y la información no están memorizadas en la estructura física del proceso de transformación, por lo que el sistema productivo no es fijo ni invariable. No ocurre lo mismo con la producción en masa (generalmente con altos niveles de mecanización), donde la secuencia de órdenes y controles, así como el conjunto de la información, se fijan de una vez para siempre, es decir, se memoriza en la propia estructura física del proceso de transformación (Cillario, 1991), permaneciendo, de esta forma, inalterable a lo largo del tiempo.

En segundo lugar, el campo de acción de la automatización no se limita únicamente a la actividad de transformación propiamente dicha, sino que va más allá, ampliando su contenido a la totalidad de las funciones relacionadas con la producción (diseño de producto y procesos, transporte y manejo de materiales, control de inventarios, control de calidad y mantenimiento de equipos e instalaciones, entre otras), permitiendo la gestión integral de la fábrica y sus sistemas adyacentes, lo que contribuye a transformar el funcionamiento de la empresa.

En este sentido, la fabricación integrada por ordenador (*Computer Integrated Manufacturing*, CIM) es el resultado de la fusión de todas las aplicaciones productivas de las nuevas tecnologías (**Figura 1**). Algunos autores (Groover y Wiginton, 1986) consideran que la CIM se basa en tres características fundamentales: (a) integración de todas las funciones organizativas relacionadas con la fabricación –entrada de pedidos, diseño, planificación, control de existencias, procesamiento, control de calidad y comercialización–; (b) utilización de una base de datos centralizada o un conjunto de bases de datos distribuidas para todas las funciones (de hecho, la CIM es, en cierto sentido, fabricación basada en datos) y (c) conexión de las distintas funciones a través de una red de comunicaciones. La acuñación de este acrónimo (CIM) se atribuye a Harrington (1973), que hizo notar que la nueva estructura de control y comunicaciones definida de este modo resultaba mayor que la suma de sus partes y, por lo tanto, merecía un nombre.

La CIM constituye una tendencia, más que una realidad, pues las posibilidades reales de aplicación de las nuevas tecnologías de la información a la fabricación residen en su capacidad para integrar las operaciones adyacentes entre sí y éstas con los sistemas globales de control (y no en su simple uso a modo de máquinas-herramientas funcionando de forma independiente sin ningún tipo de conexión al resto del proceso) (Gold, 1982). En su camino hacia la CIM, algunas fábricas automatizan grupos de actividades de forma independiente, dando lugar a lo que se conoce como ‘islas de automatización’. Posteriormente, hay que conectar estas islas a través de una base de datos común, si se pretende no minorar las posibilidades estratégicas de la automatización.

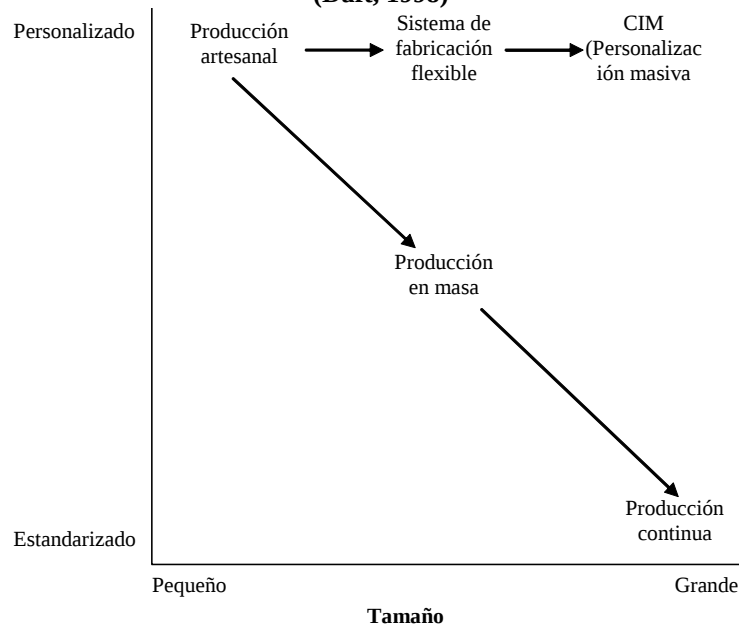
FIGURA 1: FUNCIONES DE UN SISTEMA DE FABRICACIÓN INTEGRADO
Merchant (1980)



El nivel extremo de la automatización persigue conectar las actividades ajenas a la producción, procedentes de las áreas administrativa, comercial y financiera, entre otras. Ello da lugar a la ‘fábrica oscura’, donde se elimina el papeleo, ya que las instrucciones pasan de ordenador a ordenador, y de éstos a las máquinas, para realizar las diversas operaciones en planta. Todo ello se realiza sin la intervención del trabajador. Esta idealización hace referencia igualmente, no sólo a la reducción de los costes de la mano de obra, sino a que elimina los errores humanos.

El desarrollo de la CIM se percibe como la base de una nueva revolución industrial: la llegada de la ‘fábrica del futuro’ (Rosenthal, 1984), cuya finalidad es la producción en masa a la medida, según la cual las fábricas pueden entregar productos masivos diseñados de acuerdo con las especificaciones exactas del cliente (**Figura 2**). De este modo, la CIM se convierte en una vía para lograr la personalización masiva o *mass customization* –analizada en el capítulo 2–. La fábrica ideal puede cambiar rápidamente de un producto a otro, trabajando de manera precisa, con pocos operarios directos, sin papeleo o mantenimiento de registros que frenen el sistema. El objetivo de la automatización es producir lotes de una unidad con el mismo coste unitario que lotes grandes. El capital invertido en la fábrica es flexible, no fijo, y se aplica con facilidad a la fabricación de productos nuevos o mejorados. Por ejemplo, Levy Strauss comenzó a ofrecer pantalones de mezclilla (tela en la que hay fibras de diferentes materias textiles; particularmente, de lana y algodón), hechos a la medida. El vendedor introduce las medidas del cliente en un ordenador, que integra un patrón digital único. Luego, el patrón se envía vía módem a la fábrica, donde cortadoras robóticas y otro equipo avanzado de costura y acabado producen miles de pantalones de mezclilla, cada uno para un cliente específico (Daft, 1998).

FIGURA 2: RELACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES Y AUTOMATIZADAS
(Daft, 1998)



En la fábrica del futuro tendremos instalaciones pequeñas, tiempo de preparación de las máquinas reducidos, flujos de materiales irregulares y productos personalizados. No habrá inventarios entre etapas de proceso y disminuirá el número de operarios. Se procurará hacer las cosas bien desde el primer momento y la inspección se realizará en cada una de las etapas del proceso, en lugar de hacerla sólo al final. Gran parte de la tarea de los operarios se centrará en el buen mantenimiento de las máquinas, que se encargarán de hacer todo lo demás. Las implicaciones para los directivos serán una elevada formación, descentralización de la toma de decisiones, trabajo en equipo, liderazgo participativo, pocas posibilidades de error y una mano de obra muy cualificada.

Dado que la automatización de los sistemas productivos conduce al logro de niveles aceptables de flexibilidad y eficiencia –rompiendo la tradicional consideración de estos dos objetivos como antagónicos–, a continuación, se profundiza en el concepto de flexibilidad en fabricación y sus diversas dimensiones.

LECTURA 1: EL FINAL DE LA CLASE OBRERA

Los trabajadores se extinguen: desde cervezas y cremas hasta impresoras y coches se producen hoy con máquinas robotizadas e interconectadas. En Estados Unidos ya funcionan fábricas ‘sin luces’, sin un solo operario y controladas a distancia.

Los robots trabajan sin descanso, día y noche. Los seres humanos, mientras, se sientan y se solazan, ajenos a toda preocupación, y dedican su tiempo a cultivar las artes contemplativas. Ésta es una de las viejas utopías de la ciencia ficción, presente en obras como *Los Humanoides* de Williamson o *El Sol Desnudo* de Asimov. Y está a punto de cumplirse, al menos, en su primera parte.

“Muchas empresas funcionan sólo con máquinas robotizadas”. Lo explica Sergio Iglesias, responsable de sistemas de comunicación autómatas-PC de Siemens. “Por ejemplo, las cerveceras. La malta, el lúpulo, el agua destilada y la levadura llegan por un lado y salen por otro convertidas en cervezas ya embotelladas, embaladas y colocadas en palés. Y lo mismo hace la industria farmacéutica...”.

En Estados Unidos incluso existen ya plantas industriales que trabajan durante alguno de sus turnos sin un solo operario, ¡con las luces apagadas! Es el caso de la fábrica de componentes plásticos ABA-PGT, que produce equipo para el riego de jardines y piezas para impresoras. O de la química Air Products & Chemicals, que fabrica gases industriales.

En todos estos casos, las máquinas trabajan solas durante al menos uno de los turnos. Todo el proceso de varias factorías lo supervisa un solo operario, desde su casa a decenas de kilómetros, y delante de un ordenador. Y luego los trabajadores sólo tienen que llegar, recoger los productos, ya terminados y embalados, y entregarlos para su transporte al destino final.

¿Cómo es posible? Sencillo. Gracias a los procesos TIA (siglas en inglés de Integración Total en Automatización). Hoy en día, muchos fabricantes de maquinaria incorporan en sus equipos pequeños ordenadores que controlan todo el proceso. Se convierten, así, de simple maquinaria en autómatas programables.

Además, le incorporan *buses*, una especie de enchufes para enviar y recibir datos, bien mediante cables o a través de sistemas inalámbricos. Gracias a estos *buses*, las nuevas máquinas autómatas (PLC, en el argot) pueden manejarse a distancia y gestionarse desde un sistema superior.

Todo el proceso funciona en varias capas o niveles. El más bajo lo componen las máquinas más sencillas, que constan de un AS-I (Actuador Sensor-Interfaz). Por ejemplo, un fin de carrera, un aparato que hace algo hasta que llega a un punto. En ese momento, y a través del AS-I, envía una señal y espera instrucciones.

Varias herramientas con AS-I se integran en un *Prosibus*. Éste es un *bus* más complejo, desarrollado hace ya una década, y que permite que varias máquinas hablen entre ellas. Por ejemplo, sería el encargado de decirle a la herramienta anterior que espere, porque otro aparato del que depende todavía no ha terminado su tarea, y las piezas que necesita aún no han llegado. O que continúe, y vuelva a empezar desde el principio.

A su vez, varios *Prosibus* se integran en una red *Ethernet*. La principal diferencia entre *Prosibus* y *Ethernet* es que los primeros transmiten la información de manera inmediata. En cambio, los conectores *Ethernet* tienen una capacidad de transmisión de datos infinitamente superior, pero admiten retrasos. Como explica Sergio Iglesias, “*Prosibus* sería un sistemas de ‘hablo y me responde’, mientras que *Ethernet* es más de ‘hablamos todos y a ver si nos entendemos”.

Finalmente, todos los equipos conectados con *Ethernet*, se integran a su vez en un MES (*Manufacturing Execution System*). Es decir, un *link* o pasarela desde el nivel de fabricación automatizada al de gestión. Esto permite que todos los datos de las máquinas, como unidades producidas, incidencias, consumos, etc., pasen a los sistemas de gestión o ERP.

Desde el nivel de *Ethernet*, los autómatas incorporan ya una tarjeta, que les permite acceder a un servidor *mail/web*. Es decir, la máquina tiene su propia página web, con sus interruptores, y éstos se pueden manejar de forma remota. Todo el proceso se visualiza a distancia, con un sistema SCADA (sistema de adquisición y control de datos). Es decir, desde la pantalla de un ordenador.

Estas tecnologías se extienden sin ruido (y sin luces) y son una forma de que países avanzados afronten la competencia de zonas de mano de obra barata, como el sudeste asiático ¿Qué hubiera pensado Carl Marx de todo esto?

Fuente: Fuentes de las, A. (2002): “El final de la clase obrera”, *El Mundo*, 1 de diciembre, p. 12.

2.1. Flexibilidad

La variedad de definiciones de flexibilidad en fabricación es muy alta y es habitual encontrar solapamientos entre las mismas. Parte del contenido de algunas definiciones se ha recogido en otras, aunque no exista una gran relación entre ellas en lo que se refiere a aquel aspecto de la flexibilidad que en cada definición se ha considerado más relevante. Por otro lado, algunos conceptos utilizados son una agregación de conceptos o definiciones más simples, si bien se han presentado como nuevos y muchos autores utilizan las mismas expresiones o denominaciones para aludir a conceptos y situaciones distintas, lo que da lugar a la aparición de confusiones terminológicas, difíciles de clarificar debido a la naturaleza intangible de su realidad. En otras ocasiones, el adjetivo ‘estratégica’ se ha añadido de forma creciente al concepto de flexibilidad para indicar, en muchos casos, cambios a un nivel más alto de agregación y, en otros, de forma

gratuita.

La flexibilidad en fabricación es un constructo multidimensional que representa la habilidad o capacidad de un sistema de producción para adaptarse con éxito a las condiciones cambiantes del entorno, a las necesidades del proceso y de los clientes, sin incurrir en grandes penalizaciones en tiempo, calidad y coste.

Entendida como una capacidad, la flexibilidad puede utilizarse estratégicamente de forma tanto ofensiva como defensiva. La utilización defensiva implica acudir a la flexibilidad como medio para reaccionar ante los cambios, mientras que la utilización ofensiva supone emplearla como medio para modificar el entorno, permitiendo, de este modo, a la organización dictar las reglas de competencia en el mercado.

Respecto a su dimensión temporal, Olhager (1993) destaca que, en el corto plazo, la flexibilidad se identifica con la habilidad para adaptarse a las condiciones cambiantes utilizando el actual conjunto de recursos. En el largo plazo, mide la habilidad para introducir nuevos productos, nuevos recursos y nuevos métodos de producción, e integrar éstos en el sistema de fabricación existente.

El hecho de que la flexibilidad sea un concepto multidimensional ha llevado a los investigadores a tratar de establecer una taxonomía de la misma. Sin duda, una de las taxonomías más citadas en la literatura es la propuesta por Gerwin (1993). Dicho autor reconoce la existencia de siete dimensiones de flexibilidad:

- a) Flexibilidad de volumen: Se trata de la habilidad para cambiar el volumen de producción de un proceso de fabricación.
- b) Flexibilidad de materiales: Representa la habilidad del sistema de producción para adaptarse a las variaciones en materiales y partes que están siendo procesados. Esta flexibilidad se descompone a su vez en: 1) la habilidad del sistema para manejar los materiales y 2) la flexibilidad propia e inherente a los materiales utilizados.
- c) Flexibilidad de mezcla: Es la habilidad del sistema para fabricar diferentes productos durante el mismo período de tiempo. Los sistemas de producción con elevados grados de flexibilidad de mezcla logran economías de alcance y reducidos tiempos de entrega mientras ofrecen un amplio rango de productos relacionados.
- d) Flexibilidad de modificación: Es la habilidad del sistema para incorporar cambios de diseño en un producto específico. Mejora la habilidad del sistema de producción para procesar, adaptar y actualizar diseños de un producto o personalizar un producto básico para un cliente o grupo de clientes específico.
- e) Flexibilidad de cambio: Es la habilidad del sistema para adaptarse a los cambios en el proceso de producción, es decir, representa la capacidad para convertir un sistema de producción desde su actual línea de productos a otro grupo de productos. Permite introducir nuevos tipos de productos rápidamente y con bajos costes de readaptación de las máquinas-herramientas.
- f) Flexibilidad en rutinas o secuencias: Es la habilidad del sistema para cambiar la secuencia de pasos en el proceso productivo a través del cual el producto debe progresar.
- g) Flexibilidad de respuesta o reacción: Es la habilidad de un sistema de producción para cambiar, adaptar o ajustar el énfasis en las anteriores dimensiones de flexibilidad

ante los cambios en el entorno interno y externo en cualquier momento del tiempo.

A su vez, varios autores señalan que cada dimensión de flexibilidad recogida en la anterior taxonomía, se puede descomponer en dos elementos, denominados ‘rango’ y ‘movilidad’. El rango define el grado o extensión de la flexibilidad en cada dimensión y la movilidad representa la agilidad de la empresa para la realización de cambios en cada dimensión (Upton, 1994). Asimismo, la literatura recoge distintas agrupaciones de los conceptos de flexibilidad anteriormente comentados, de acuerdo con criterios de clasificación convencionales. En esta línea, cabría señalar trabajos como el de Adler (1988), que identifica distintas flexibilidades en relación con el producto o el proceso, haciendo, así, alusión a las dos dimensiones de la focalización. Por su parte, Sethi y Sethi (1990) proponen una taxonomía de once tipos de flexibilidad, que se agrupan en tres grandes bloques: (a) flexibilidades básicas (maquinaria, transporte y almacenamiento de materiales y operaciones), (b) flexibilidades del sistema (proceso, rutinas, producto, volumen y expansión) y (c) flexibilidades agregadas (programa, producción y mercado). A partir de esta agrupación, se pueden realizar dos interpretaciones de acuerdo con la metodología del proceso estratégico: de un lado, las flexibilidades básicas influyen sobre las flexibilidades del sistema, lo cual determina, a su vez, la flexibilidad agregada; por otro lado, y de forma alternativa a la anterior, se puede argumentar que la estrategia de fabricación tradicional debería indicar las flexibilidades agregadas necesarias, las cuales determinarían las flexibilidades del sistema que hacen falta y, en función de éstas, las flexibilidades básicas (Beach *et al.*, 2000). La relación entre las distintas dimensiones de flexibilidad establece la idea de existencia de una jerarquía que distingue entre dimensiones primarias y dimensiones secundarias, estando éstas últimas contenidas en las primeras.

3. PRINCIPALES TÉCNICAS DE AUTOMATIZACIÓN

A continuación, se analizan algunas de las principales técnicas de automatización aplicadas en la fábrica: los robots, el control numérico por ordenador (CNC), los sistemas automatizados de manejo de materiales (AMH), los sistemas de fabricación flexible (FMS), los sistemas de diseño, fabricación e ingeniería asistidos por ordenador (CAD/CAM/CAE) y la tecnología de grupo (GT). No haremos referencia a las tecnologías en sí ni a los materiales que transforman, sino al contexto en el que se utilizan, haciendo especial hincapié en los aspectos estratégicos y organizativos.

3.1. Robots

La mención de los robots nos recuerda a los androides R2-D2 y C-3PO de la saga *La Guerra de las Galaxias*, pero estas simpáticas máquinas pensantes nada tienen que ver con los robots utilizados en las fábricas. Los primeros robots industriales se introdujeron a principios de los años 60 y en la actualidad la robótica es uno de los elementos más representativos de los modernos sistemas productivos. Es difícil presentar una definición de robot industrial que sea aceptada con carácter general. Así, por ejemplo, Japón y Estados Unidos lideran (en primer y segundo lugar, respectivamente) la fabricación y el uso de robots industriales, si bien difieren en su definición. Por un lado, la Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA, *Japanese Industrial Robot Association*) define los robots industriales como “dispositivos capaces de moverse de modo flexible, análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, permitiendo operaciones en respuesta a las órdenes humanas”. Por su parte, la norteamericana Asociación de Industrias de Robótica (*Robotics Industries Association*, RIA) considera que un robot industrial es un “manipulador reprogramable y multifuncional, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales a través de movimientos variables programados para la ejecución de una variedad de tareas”. Se observa que la definición japonesa es muy amplia, mientras que la definición americana –internacionalmente aceptada– es más restringida.

El robot ha de ser capaz de funcionar automáticamente, por sí mismo. Para ello debe estar dotado de inteligencia, una memoria programable o, simplemente, de un juego de mecanismos ajustables que regulen su manejo. En los casos más simples consiste solamente en una serie de topes mecánicos ajustables o interruptores de fin de carrera. En el otro extremo se encuentran los controles por ordenador, que proporcionan al robot una memoria programable, lo que permite que sus movimientos sigan una trayectoria, definida en toda su longitud por una serie continua de coordenadas, e incluso estén acoplados con otro sistema de control electrónico o mecánico, con el fin de que su funcionamiento sea lo más eficaz y seguro posible (Engelberger, 1985).

La **Figura 3** recoge la clasificación y definiciones de los robots industriales de la Asociación Japonesa de Robótica Industrial. Los tres primeros tipos se conocen, en ocasiones, como robots de gama baja, mientras que los tres restantes se consideran robots de gama alta. Ahora bien, según la definición de la RIA, sólo se consideran robots los de gama alta.

FIGURA 3: CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES POR TIPO DE INPUTS Y MÉTODOS DE APRENDIZAJE
Sekiguchi (1989)

a) Manipulador manual	Un manipulador directamente operado por una persona.
b) Robot de secuencia fija	Un tipo de manipulador que opera en secuencia fija, cumpliendo las instrucciones prefijadas, condiciones y posiciones. La información prefijada no puede cambiarse fácilmente.
c) Robot de secuencia variable	Igual que el robot de secuencia fija, pero la información prefijada puede cambiarse fácilmente.
d) Robot 'playback' o de aprendizaje	Un manipulador que puede repetir una operación después de aprender de un operador.
e) Robot controlado numéricamente	Un manipulador que puede ejecutar órdenes de acuerdo con información numérica sobre posiciones, secuencia, condiciones de trabajo, etc.
f) Robot inteligente	Un robot que puede determinar sus propias acciones a través de órganos de sensibilidad.

Nota:

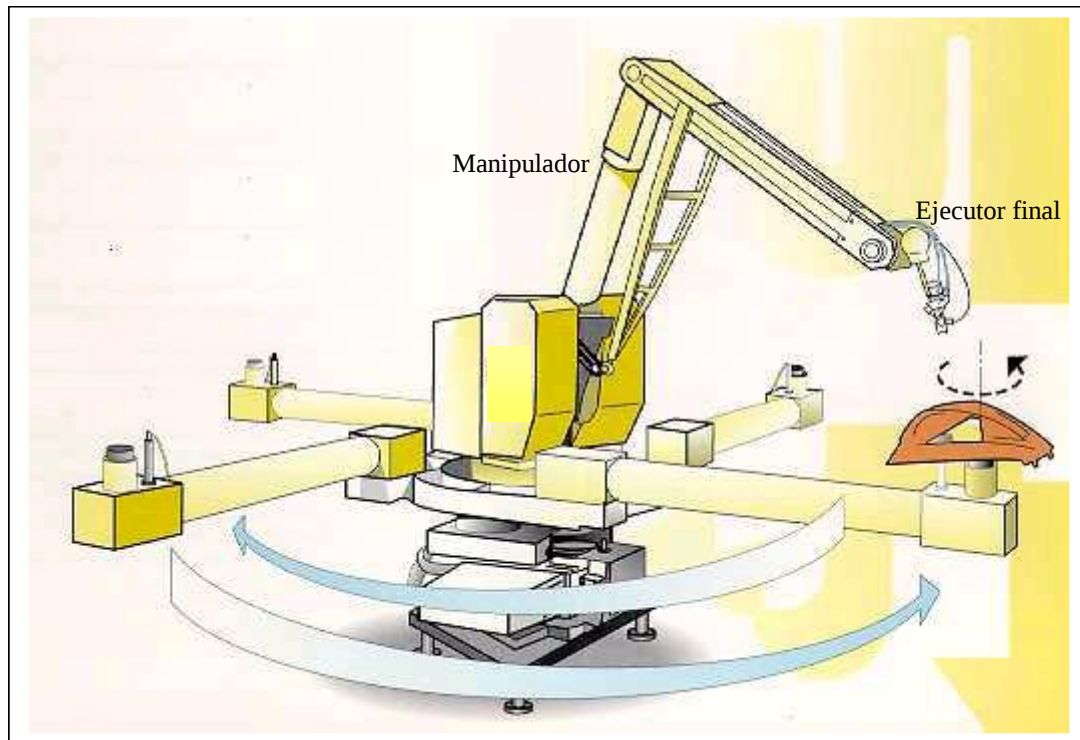
Manipulador: Un mecanismo para sujetar objetos que no requiere la guía del operador. Tiene capacidad para moverse, al menos, de dos de los siguientes modos: en círculo, afuera/adentro, arriba/abajo, derecha/izquierda, movimiento de oscilación o pliegue.

Robot: Un sistema mecánico que tiene funciones de movimiento flexibles análogas a las de los organismos vivos o que combina tales funciones de movimientos con funciones de inteligencia. Actúa en respuesta a órdenes de personas. En este contexto, una función inteligente significa la capacidad de desarrollar, al menos, una de las siguientes: juzgar, reconocer, adaptar o aprender.

Un robot industrial consta de cuatro componentes básicos (**Figura 4**): a) controlador, b) generador o fuente de energía, c) manipulador (estructura mecánica o brazo) y d) ejecutor final. El controlador es el encargado de dirigir los movimientos y operaciones que efectúa el manipulador, almacenando las órdenes y movimientos y relacionándose con el exterior. El generador se ocupa de suministrar la energía necesaria a los accionadores de la estructura mecánica. Está separado en los robots hidráulicos o neumáticos, pero en los electrónicos, que en la actualidad son mayoría, está integrado en el controlador (No, 1987). El manipulador es una serie de enlaces y juntas mecánicas capaces de hacer movimientos en varias direcciones para realizar la tarea que tiene asignada. Es, sin duda, la parte más llamativa del robot, ya que se parece al brazo humano. El manipulador está montado sobre una columna vertical, que, a su vez, se halla sobre una base. En cada configuración, el brazo del robot se mueve sobre tres ejes o 'grados de libertad'. Estos tres ejes posicionan el brazo en un espacio X-Y-Z. La extremidad del robot, que comúnmente se llama 'muñeca', tiene, igualmente, tres grados adicionales de libertad, cuyo propósito es dar orientación al brazo respecto a un punto X-Y-Z. Por otra parte, en los casos en que la base del robot se desplaza o recorre un camino, se agrega a las otras una dimensión rectangular. El ejecutor final es el dispositivo que utiliza el robot para llevar a cabo la tarea, y se sitúa en la muñeca. Aunque el ejecutor está determinado por la tarea a realizar, comúnmente se usan dos tipos básicos: sujetadores y herramientas. Los

sujetadores (ventosas, imanes o mecanismos articulados similares a una mano) se usan para ‘agarrar y situar’ objetos. Las herramientas se utilizan para realizar el trabajo sobre una pieza, e incluyen pistolas soldadoras, taladros, pistolas atomizadoras y cursores, entre otros. En síntesis, puede considerarse que el controlador es el cerebro de la operación, la fuente de energía es el músculo, el manipulador es el brazo y el ejecutor final es la muñeca y la mano (Katzan, 1984).

FIGURA 4: ROBOT INDUSTRIAL



Existen tres generaciones de robots que se utilizan en la fabricación, manipulación y pruebas. Los robots de ‘primera generación’ se introdujeron como ayuda a las técnicas de producción, y siguen siendo el tipo más común. No tienen inteligencia incorporada y están diseñados para accionar una secuencia de operaciones programadas, independientes de cualquier cambio en el entorno local. Estos robots no poseen, generalmente, la capacidad de comunicarse con el elemento a manipular, ya que carecen de sensores de percepción y, por lo tanto, necesitan una programación detallada del trabajo a realizar, lo que encarece su utilización.

Los robots de ‘segunda generación’ poseen algún tipo de inteligencia incorporada, que les faculta a percibir cambios del ambiente local, aprender de un programa determinado y modificar sus acciones. Estos robots suelen estar equipados con sensores táctiles o sensores ópticos, que pueden detectar aspectos tales como presencia, cantidad y posición de la pieza. El robot está instruido para realizar una secuencia de programa variable, dependiendo de las señales informativas que envían los sensores de detección. Actualmente existe un número muy limitado

de robots de esta segunda generación, aunque continuamente están desarrollándose nuevos modelos para aplicaciones industriales. Los sistemas de visión permiten, por ejemplo, realizar la inspección de piezas.

LECTURA 2: ROBOTS EN LA SANIDAD DEL REINO UNIDO

La ciencia ficción se acercó un paso más a la realidad ayer, cuando los robots Sister Mary y Doctor Robbie empezaron a trabajar en un hospital de Londres. La pareja permite a los médicos examinar visualmente a los pacientes y comunicarse con ellos, por más que estén en otra parte del hospital, o incluso en otra parte del mundo.

Los robots de 1,5 metros de alto, están controlados en forma remota por un médico, a través de un sistema de control. Los médicos pueden mirar a los pacientes gracias a una cámara montada sobre el robot, mientras los pacientes pueden ver a sus médicos por medio de una pantalla en la ‘cara’ de los robots. Los pacientes pueden recibir preguntas y se pueden leer registros médicos como rayos X y resultados de pruebas.

Por otro lado, e igualmente en un hospital de Londres, los médicos utilizaron un robot para realizar un trasplante de riñón. Se trata de la primera vez que se recurre a una máquina de este tipo en el Reino Unido para una operación tan difícil y delicada. El trasplante, realizado hace tres meses en el hospital Guy’s fue un éxito. El robot, llamado Da Vinci, tiene un coste de 1,4 millones de euros y es uno de los dos aparatos de los que dispone el país para intervenciones quirúrgicas.

En el trasplante, del que se informó ayer, la máquina extrajo un riñón de Pauline Payne, de 55 años, con dos brazos mecánicos, pero después se utilizó cirugía convencional para implantarlo en Raymond Jackson, novio de la donante.

Fuente: Agencia (2005): “Robots en la sanidad del Reino Unido”, *Cinco Días*, 19 de mayo.

Los robots de ‘tercera generación’ son actualmente objeto de una intensa investigación, pueden tomar decisiones inteligentes y determinar técnicas de producción óptimas. El futuro papel de esta generación de robots dependerá, probablemente, del desarrollo en paralelo de la inteligencia artificial (Hawkes, 1989).

En las fábricas actuales, los robots industriales ejecutan tareas, como la soldadura —que tradicionalmente ha sido la aplicación más extendida, especialmente en España—, carga y descarga de las máquinas, manipulación de materiales, acabados con pistola, montaje y aplicaciones de mecanizado (Devol, 1987).

La aplicación de los robots en la industria provoca un incremento de la productividad, disminuyendo los desperdicios de materiales y proporcionando una calidad más homogénea. Pero, sobre todo, sustituye a los trabajadores en la realización de trabajos simples, repetitivos, monótonos, sucios, insalubres o peligrosos, lo que contribuye a una mejora de la calidad de vida laboral y a una mayor satisfacción en el trabajo. La aplicación tradicional de los robots se ha producido, fundamentalmente, en la industria del automóvil.

LECTURA 3: LA ROBÓTICA CALA EN ESPAÑA

Tras Alemania e Italia, el mercado español lidera las inversiones en robots en Europa. Este año los resultados empeorarán, debido a la situación del sector del automóvil.

Los reyes europeos en robots industriales son los alemanes, con 99.013 robots, e italianos, con 43.911, pero muy lejos de los 360.000 de Japón y de los 100.000 de Norteamérica. En España, con 16.378 robots, aún nos quedamos cortos, pero es una tendencia que están empezando a cambiar. En el mundo se esperan ratios de crecimiento medio anual de 7,5 por ciento, según un informe de la CEE-ONU. El número total de robots industriales es de 760.000, más 176.500 robots de servicios. Para 2005 habrá 965.000 industriales y 210.000 de servicios.

El año pasado fue bueno en Europa, con un récord de 30.500 unidades vendidas y un aumento del 2,5 por ciento frente a 2000. Son espectaculares los incrementos en el Reino Unido (26 por ciento) y España (22 por ciento). Sin embargo, la inversión mundial en robótica se ha reducido una quinta parte respecto a 2000, dado que ha caído un 17 por ciento en EE.UU. y un 40 por ciento en Japón.

Un robot suele tener una vida de 12 años. Un robot industrial vendido en 2001 cuesta menos de una quinta parte que otro de prestaciones similares de 1990. Es una inversión que se amortiza en uno o dos años. El precio de un robot básico es de unos 20.000 euros, aunque hay que añadirle periféricos, como una pinza de manipulación o sistemas de seguridad y control.

“En España no hay ningún fabricante de robots industriales. En la década de los 80 hubo algunas iniciativas, pero fracasaron. Hay pocos fabricantes, y los principales están en Japón, Suecia y Alemania”, declara Antonio Vizán, presidente de AER-ATP, la Asociación Española de Robótica.

Durante 2001 se vendieron en el mercado español, que tiene un volumen de negocio de 500 millones de euros, 3.584 robots.

De hecho, la automoción es el sector más intensivo en el uso de robots: casi dos de cada tres en España. A distancia le siguen el sector químico y el de productos metálicos. En nuestro país la mitad de los robots industriales realizan tareas de soldadura, aunque van ganando difusión las aplicaciones de manipulación. En España hay una ratio de 62 robots por cada 10.000 trabajadores en la industria manufacturera, lejos de Japón (270), Alemania (130) e Italia (100). En las fábricas de automoción estas ratios aumentan; por ejemplo, en Italia y Alemania, hay casi un robot por cada diez trabajadores.

Esta dependencia hace que el traslado de producción a fábricas en países de Europa del Este perjudique a la industria de robótica. “No es bueno dejar de tener producción propia dentro del país”, valora Antonio Vizán, de AER-ATP. Sin embargo, Tróbal ve la parte positiva: “Cada vez hay más sectores que tienen procesos repetitivos en los que es fácil introducir un robot”.

Fuente: Martín, E. (2002): “La robótica cala en España”, *Cinco Días*, 30 de noviembre, p. 15.

3.2. Control numérico por ordenador

Las máquinas-herramientas convencionales realizan una serie de operaciones elementales con un solo propósito –taladrar, torneear, cepillar, fresar y cortar, entre otras– bajo la supervisión directa de un operario, quien, de acuerdo con un plan especificado, estudia los planos de la pieza y, luego, dirige manualmente la máquina controlando las variables de mecanizado –tiempo, velocidad, longitud o profundidad, entre otras–. Las primeras máquinas-herramientas tenían un solo eje, realizaban una única operación en la pieza y necesitaban un operario para su manejo. Si una pieza requería varias operaciones de mecanizado, se trasladaba de una máquina a la siguiente, utilizando, generalmente, un transportador de rodillo manejado manualmente. Esto significaba una preparación y la realización de una actividad independiente para cada función de mecanizado. De esta forma, la productividad de las antiguas líneas de producción estaba limitada por el tiempo que se requería para cargar, mecanizar, descargar la pieza y trasladarla entre máquinas. Esta restricción se eliminó parcialmente debido a la aparición de la máquina de ejes múltiples, que, mediante la utilización de un tren de engranajes y bajo el control de un único operario, podía efectuar diversas operaciones de mecanizado en la misma pieza. No obstante, cada vez era más difícil cortar las estructuras de las piezas, en parte debido a las formas geométricas que las configuraban, definidas por funciones matemáticas.

Las primeras máquinas de control numérico (*Numerical Control*, NC) se desarrollaron en los años 50 en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) con el fin de obtener métodos más eficientes para la fabricación de los aviones *jet* de las Fuerzas Aéreas Norteamericanas.

El NC tiene tres componentes: el programa, el controlador y la máquina. El programa NC es un conjunto de instrucciones consistentes en una determinada posición de letras, números y símbolos. El manuscrito que hace el programador se denomina ‘documento fuente’, y se debe convertir a un medio sobre el cual puede actuar la unidad de control de la máquina-herramienta para dirigirla. De esta forma, el programa se almacena en una cinta de papel, en una cinta magnética o en cualquier otro medio, y lo lee el controlador de la máquina cada vez que tiene que realizar la operación (Schmitt y Farwell, 1983). El modo de almacenamiento más utilizado es la cinta de papel, donde cada instrucción viene representada por una secuencia de orificios perforados codificados, correspondiendo la disposición de los distintos agujeros a diferentes instrucciones para la trayectoria de la herramienta. Por otra parte, existen muchos lenguajes en los que se puede escribir un programa para el NC, pero el más utilizado es el denominado ‘Herramienta Programada de Forma Automática’ (*Automatically Programmed Tools*, APT). Este lenguaje se sigue usando en la actualidad y permite que el programador, empleando instrucciones sencillas en inglés, defina la geometría de la pieza y, de esta forma, especifique la trayectoria necesaria de la herramienta para que la máquina actúe de la manera adecuada.

El controlador es un componente crítico, ya que constituye el enlace entre el programa NC y la máquina que lleva a cabo las tareas. Este dispositivo, generalmente integrado en la máquina, lee e interpreta el programa y lo traduce en órdenes de actuación que la máquina debe ejecutar. Un controlador dado funcionará únicamente con un lenguaje de programación, y con un único tipo de máquina (Schmitt y Farwell, 1983).

La máquina es el componente que realmente realiza el trabajo. Su tamaño y complejidad son función de la tarea que es capaz de realizar, así como de los materiales brutos que debe transformar.

La secuencia descrita tiene un gran inconveniente: la rigidez que supone que las funciones de control (programa) estén definidas en un elemento físico inalterable (cinta de papel, normalmente), por lo que resultan difícil de modificar. Cuando la máquina lleva a cabo un nuevo trabajo de producción, hay que volver a escribir el programa específico que el nuevo trabajo requiere.

Con el paso del tiempo, se sustituyó el codificador y decodificador de cintas por un microprocesador incorporado a la máquina, y se le denominó control numérico por ordenador (*Computer Numerical Control*, CNC). El CNC está formado por: 1) una máquina-herramienta típica utilizada para hacer girar, perforar o conformar distintos tipos de piezas y 2) un ordenador que controla la secuencia de las tareas realizadas por la máquina. Así, pues, el CNC utiliza los principios esenciales del control numérico tradicional, pero emplea un programa almacenado para realizar las funciones de control numérico básicas. El ordenador está situado dentro de la unidad de control de la máquina y permite que se creen programas de piezas a través de su *software* y, posteriormente, posibilita el almacenamiento en su memoria. El método básico de creación de programas de piezas se denomina ‘entrada manual de datos’: entrada de instrucciones por el teclado que, como el ordenador, está unido a la máquina. En los modelos más recientes, los circuitos de control de retroalimentación determinan la posición de la herramienta durante el trabajo, comparan constantemente la ubicación real con la programada y efectúan las correcciones necesarias. Esto se conoce como ‘control adaptativo’.

El ‘centro de mecanizado’, no sólo provee control automático por ordenador, sino que la máquina tiene incorporado un depósito de herramientas que se pueden cambiar automáticamente de acuerdo con la operación a realizar. En este sentido, cada máquina-herramienta tiene un surtidor de herramientas de capacidad limitada que contiene las herramientas de corte necesarias para realizar una transformación completa. Una vez que las herramientas apropiadas se han cargado en el surtidor de herramientas, la máquina queda bajo el control del ordenador. De esta forma, cuando haya necesidad de una herramienta nueva para continuar con el mecanizado de la pieza, el surtidor de herramientas gira a su posición y el cambiador reemplaza de manera automática y en segundos la nueva herramienta por aquella que la máquina estaba utilizando. Así, pues, la tecnología del CNC se desarrolló de dos maneras. Primero, se aumentaron los grados de libertad en el movimiento de las cabezas de corte de la máquina (arriba-abajo, adentro-afuera, etc.). Segundo, se desarrolló la habilidad de los centros de mecanizado para cambiar sus propias herramientas. Juntos, estos dos desarrollos aumentaron la variedad de partes que podía producir una máquina, y permitieron el mecanizado de piezas más complejas (Slack *et al.*, 1999).

En la actualidad las máquinas de control numérico por ordenador son la forma más común de automatización. Una vez creado, el programa de piezas puede ejecutarse directamente desde la memoria cuantas veces se desee. Además de la ventaja que supone la memoria, los sistemas CNC reducen el tiempo de desarrollo o de preparación de un nuevo proceso, ya que facilitan la realización de correcciones y depuraciones del programa. También es posible realizar operaciones de contorno complicadas, gracias a las grandes posibilidades que ofrece el ordenador para la manipulación matemática. Además, el ordenador puede mantener bajo supervisión tanto a la máquina como a sí mismo, permitiéndole detectar fallos electrónicos y mecánicos (Schmitt y Farwell, 1983).

Cuando varias máquinas-herramientas están enlazadas con, y a través de, un ordenador, que

dirige y controla sus operaciones, reciben la denominación de control numérico directo (*Direct Numerical Control*, DNC). Un DNC es capaz de controlar hasta 256 máquinas, aunque la mayor parte de ellos no llega a esa cantidad. El principal inconveniente de esta tecnología reside en el elevado coste del microprocesador y sus periféricos. Por otra parte, si el número de máquinas es alto, puede resultar adecuado montar un sistema de gestión jerarquizado, con ordenadores intermedios que controlen grupos de máquinas. Estos ordenadores intermedios reciben del ordenador central grupos de programas y los almacenan en sus respectivas memorias. Así mismo, gestionan las comunicaciones con las máquinas-herramientas a las que están conectados, les transmiten los programas cuando los precisan y reciben y almacenan los datos sobre el desarrollo de la producción enviados por el controlador de las máquinas. Posteriormente, transfieren toda la información a la base de datos del ordenador central (Warner, 1984).

3.3. Sistemas automatizados de manejo de materiales

Los sistemas automatizados de manejo de materiales (*Automated Materials Handling*, AMH) mejoran la eficiencia en el transporte, almacenamiento y recuperación de materiales. Algunos ejemplos son los transportes automatizados y los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación de piezas.

Los vehículos guiados por control remoto (*Automatic Guided Vehicle*, AGV) son vehículos de reducido tamaño, con energía independiente, que transportan materiales a través de las instalaciones productivas, siguiendo una trayectoria bajo el suelo o en la superficie de la fábrica en forma de bandas metálicas. Todo ello se realiza de acuerdo con las instrucciones de un ordenador que lleva incorporado o de un ordenador central. El ordenador es quien controla el transporte y elige la ruta. En ocasiones, los vehículos guiados por control remoto disponen de un ordenador propio o de un panel de control (o bien de ambos). El sistema monorraíl, a través del empleo de microprocesadores, permite diversificar el número de paradas y acciones a lo largo de la ruta. De este modo, consigue adaptarse a las necesidades de las máquinas a las que sirve.

Muchos AGV incorporan también sensores, que pueden comunicar información sobre situación, cargamentos y colisiones, así como diversos dispositivos de manipulación, tales como pinzas telescópicas y transportadoras integrales (Hawkes, 1989). Así mismo, se están desarrollando versiones más sofisticadas, como rutas de vehículos programables por *software*, que son, por consiguiente, muy fáciles de cambiar e infinitamente variables. Además de la reducción de costes derivadas de la sustitución de la mano de obra por tecnología en estas actividades que no generan valor, la utilización de AGV favorece las entregas ‘justo a tiempo’ de los materiales, piezas o componentes entre las diferentes fases del proceso de producción.

Actualmente, algunas fábricas de automóviles utilizan los AGVs como medios móviles de transporte, sobre todo para cargas pesadas. Los trabajadores los prefieren, porque no funcionan con la rigidez característica de la cinta transportadora, ya que los AGVs no se ponen en marcha hasta que cada operario ha finalizado correctamente su trabajo a su propio ritmo.

En los sistemas de almacenaje asistidos por ordenador (*Automated Storage and Retrieval System*, AS/RS) los materiales se almacenan y se recuperan automáticamente en lugares libres, de los que salen nuevamente siguiendo ciertas reglas de prioridad. Dichos sistemas están formados básicamente por robots de carga/descarga, unidos a vehículos móviles a lo largo de un carril. Con el apoyo de la AGV un AS/RS puede recibir y entregar materiales sin la intervención del

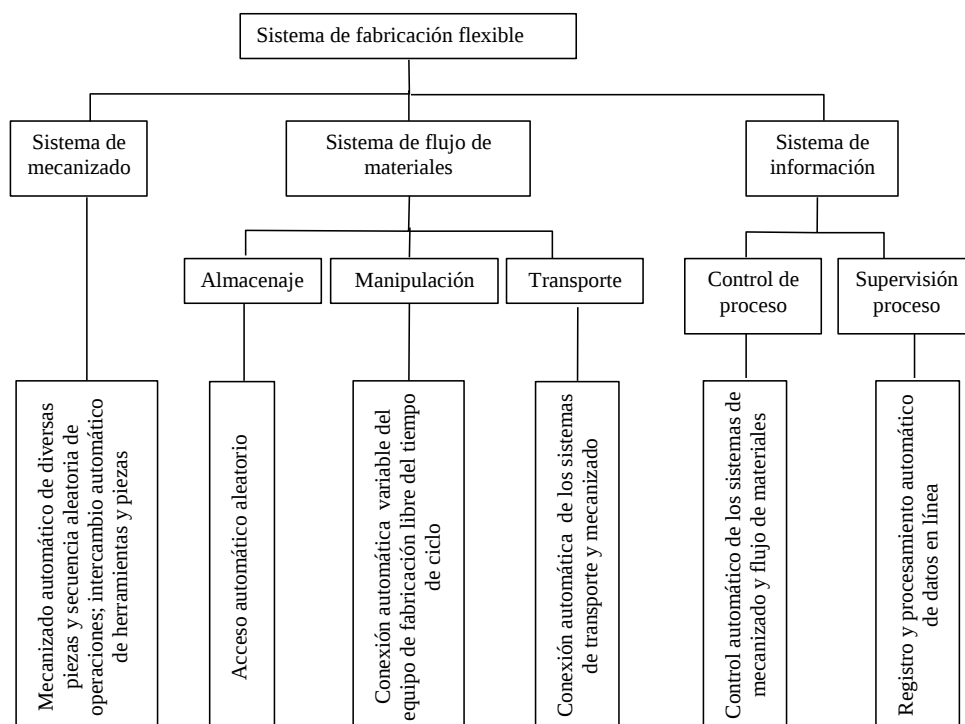
trabajador.

La tecnología del código de barras se utiliza para que las máquinas de almacenamiento y recuperación identifiquen cuál es la carga que deben recoger. El código de barras consta de una serie de barras negras, que pueden leerse mediante un escáner óptico. El código de barras contiene el nombre del producto, número de lote, lugar de fabricación, localización en los estantes y precio. Estos códigos pueden imprimirse directamente en el envase, en el producto o en una etiqueta que se adhiere al producto. Las operaciones de venta al por mayor y al por menor también utilizan la tecnología de código de barras (Noori y Radford, 1995).

3.4. Sistemas de fabricación flexible

Un sistema de fabricación flexible (*Flexible Manufacturing System, FMS*) es un conjunto de máquinas enlazadas a través de un sistema automático de manejo de materiales, cuya secuencia está dirigida y coordinada por un ordenador central (**Figura 5**). Debido a la versatilidad de las máquinas-herramientas y a la capacidad de intercambiar herramientas de corte con rapidez (en segundos), estos sistemas son relativamente flexibles respecto al número de tipos de piezas que pueden producir de manera simultánea y en lotes de tamaño reducido (a veces, unitario). Estos sistemas pueden ser casi tan flexibles y de mayor complejidad que un taller artesanal y, al mismo tiempo, tener la capacidad de alcanzar la eficiencia de una línea de montaje bien equilibrada.

FIGURA 5: ESTRUCTURA, TÉCNICA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE
Fix-Sterz y Lay (1987)



Los sistemas de fabricación flexible constituyen una etapa más en el proceso evolutivo hacia la fabricación automática. El elemento determinante de un sistema flexible es, como su nombre

indica, la flexibilidad: este sistema permite la fabricación de piezas que tienen escasa relación entre sí, sin necesidad de realizar un proceso adicional de equipamiento y reestructuración de las máquinas y/o de las instalaciones. Los FMS están concebidos para la fabricación de lotes de tamaño pequeño y mediano (Puente, 1983) y, en este sentido, permiten la fabricación de un volumen reducido de una amplia variedad de piezas. Además de la flexibilidad, las empresas que aplican FMS consiguen otros beneficios, entre los cuales cabe destacar los siguientes (Bessant, 1991): (a) reducción del tiempo de producción y entrega (de ‘puerta a puerta’), (b) ahorro en inventarios, en especial de existencias en curso, (c) mayor intensidad de utilización de los equipos, (d) reducción de los tiempos de preparación de las máquinas, (e) reducción del número de máquinas en funcionamiento (menor número de máquinas, pero más complejas) y (f) mejora de la calidad. Algunas empresas han experimentado beneficios adicionales, tales como: ahorros de espacio, menor dependencia de los proveedores, mejoras en las características de los prototipos, mejoras en la respuesta a los clientes (velocidad y calidad del servicio) y reducción en los ciclos de innovación.

Los FMS se utilizan frecuentemente en la fabricación de electrodomésticos, material electrónico, piezas de maquinaria, maquinaria de construcción y agrícola y, fundamentalmente, en la industria de maquinaria pesada (máquinas-herramientas).

Un sistema de fabricación flexible utiliza, al menos, un elemento perteneciente a cada uno de los cuatro grupos siguientes (Browne *et al.*, 1984):

- a) Máquinas-herramienta, ya sean de uso general o especializadas, con cambio de herramientas automático (CNC, DNC).
- b) Dispositivos de transporte y carga. El equipo incluye: robots coger y colocar; cambiadores de paletas automáticas que alimentan continuamente componentes a las máquinas; cintas transportadoras y transporte de materiales asistido por ordenador, a través de medios fijos o móviles y abarcando tanto las piezas en proceso como las herramientas (AGV).
- c) Áreas de almacenaje de productos en proceso con carga y descarga automatizada (AS/RS). Estos dispositivos están programados para identificar, almacenar y localizar automáticamente cargas, a partir de una matriz geográfica de las estanterías.
- d) *Software* que controle por ordenador la secuencia de operaciones, reglas, prioridades, tráfico de flujos de materiales, tipos de piezas y calidad de éstas, a través de un sistema jerárquico con diversos niveles de descentralización.

La red de ordenadores en un FMS está estructurada jerárquicamente, con tres niveles de operación. Un ordenador principal (*host*) ejerce el control de todo el sistema de ordenadores. El segundo nivel de ordenadores, subordinado al principal, está formado por el módulo de control numérico directo (DNC). El nivel más bajo es el control numérico por ordenador (CNC), que está directamente relacionado con la máquina-herramienta (Mochón *et al.*, 1986).

Algunas distribuciones FMS están formadas por células de fabricación flexible (*Flexible Manufacturing Cell*, FMC). Éstas comprenden un pequeño número de máquinas-herramientas conectadas a través de un sistema de transporte o un robot de manipulación. Así, una célula podría consistir en un robot y un centro de mecanizado. El robot podría programarse para que coloque y retire automáticamente piezas del centro de mecanizado,

permitiendo con ello realizar una tarea sin necesidad de operarios.

3.5. Diseño, fabricación e ingeniería asistidos por ordenador

El diseño asistido por ordenador (*Computer Aided Design*, CAD) es un sistema electrónico que permite el diseño de nuevas piezas o componentes o la modificación de los actuales, sustituyendo el diseño tradicional a mano. Se trata de un proceso de diseño que emplea sofisticadas técnicas gráficas de ordenador, apoyadas en paquetes de *software*, con el fin de ayudar en los problemas analíticos, de desarrollo, de coste y ergonómicos asociados a las actividades de diseño (Hawkes, 1989).

El CAD agrupa las aplicaciones del ordenador a la representación gráfica y utiliza modelos bidimensionales y tridimensionales, análisis de elementos finitos y análisis ergonómico. El análisis de elementos finitos es una de las técnicas más utilizadas dentro del CAD, ya que permite al diseñador efectuar un análisis de componentes complejos, descomponiendo una forma en otras más pequeñas, es decir, en simples elementos finitos. Estos elementos se denominan, a veces, discretos y, al proceso de generación, ‘discretización’ de la forma componente.

Una de las ventajas más importantes del CAD es su capacidad de archivar resultados en soportes que permiten su fácil reproducción y manipulación. Asimismo, cabe destacar los siguientes beneficios derivados de su utilización (ADAMICRO, 1986; Hawkes, 1989): (1) agilizar y potenciar el diseño de piezas y otros elementos de ingeniería, (2) visualizar y generar las mejores perspectivas de un diseño, (3) obtener distintas secciones del objeto diseñado, (4) simular el comportamiento real del elemento a crear frente a situaciones o problemas específicos, (5) introducir modificaciones en el diseño, (6) controlar y revisar las especificaciones que deben cumplirse, (7) generar la documentación técnica necesaria para el proceso de fabricación, (8) mayor precisión en los dibujos, (9) dibujos más limpios, (10) técnicas especiales de dibujo (como el *zooming*), (11) análisis y cálculo de diseño más rápidos, (12) menores requisitos de desarrollo y (13) integración del diseño con otras disciplinas. Por todo ello, el CAD permite reducir el tiempo y el coste de desarrollo de los productos y, en consecuencia, acorta el tiempo necesario para comercializar nuevos productos.

Una de las consecuencias de la introducción de los superordenadores en la industria del automóvil ha sido que todos los modelos de las diferentes marcas son parecidos. Utilizando las mismas herramientas informáticas y los mismos programas para el diseño de la forma aerodinámica de los vehículos, se están fabricando coches que se asemejan como si fueran gemelos. Éstos eran los comentarios de pasillo de la reunión de diseñadores, investigadores e ingenieros de la industria del automóvil, celebrada en octubre de 1988 en Sevilla, sobre el uso de los superordenadores en las actividades de este potente sector.

Una especialización del CAD la constituye el diseño para la producibilidad (*Design For Manufacturability*, DFM), que incluye en el diseño las características del proceso que, posteriormente, va a utilizarse para fabricar la pieza. De esta forma, se reducen los costes de producción y el sistema resulta más eficiente. El diseño para la producibilidad consiste en adaptar un diseño de producto sin alterar sus objetivos de comportamiento, de modo que se pueda producir al coste más bajo con los materiales disponibles en el tiempo más corto. El DFM constituye un esfuerzo interdepartamental sin papel. El producto se mantiene a modo de modelo en un ordenador hasta que todos los miembros del equipo –desde diseño, ingeniería y fabricación

hasta servicio al cliente y proveedor principal– queden satisfechos. Una vez obtenida la aprobación de todos los miembros del equipo, los datos sobre las partes se transfieren electrónicamente a sistemas de fabricación asistidos por ordenador.

La fabricación asistida por ordenador (*Computer Aided Manufacturing*, CAM) se ha utilizado desde hace tiempo en los procesos de producción continuos, si bien su aplicación a la fabricación por lotes es relativamente reciente. Bajo la denominación CAM se suele incluir: (a) los robots industriales, (b) las máquinas-herramientas de control numérico, el control numérico por ordenador y el control numérico directo, (c) los sistemas de fabricación flexible, (d) los sistemas automatizados de manejo de materiales, incluyendo el control de existencias, y (e) los sistemas de verificación automatizados, cuyas aplicaciones cubren un amplio espectro.

Las características de cada uno de estos componentes del CAM ya se han comentado previamente, a excepción de las relacionadas con los sistemas de verificación automatizados. El control de calidad asistida por ordenador (*Computed Aided Quality-Assurance*, CAQ) y la prueba de procesos asistida por ordenador (*Computed Aided Testing*, CAT) controlan o verifican la calidad de los productos fabricados y ejecutan acciones de corrección, en caso de resultar necesarias. También realizan controles no simultáneos en el proceso de fabricación, llevados a cabo por máquinas de medida de control numérico o en laboratorio, con aparatos electrónicos de medida controlados por ordenador. Una variante la constituye lo que podría denominarse control de calidad de la ejecución del proceso, que abarca las funciones de mantenimiento predictivo (sustituir elementos cuando alcanzan unos valores críticos) y preventivo (sustituir elementos a intervalos de tiempo preestablecidos).

La integración de las operaciones de preparación (diseño) y ejecución (producción) se convierten en un elemento de crucial importancia, que se realiza a través de los llamados sistemas CAD/CAM. La integración entre el CAD y el CAM hace posible diseñar el producto y especificar el proceso de modo simultáneo, lo que permite reducir de modo drástico los errores y pérdidas originados al pasar de la fase de diseño a la de fabricación (Thompson y Paris, 1982). Esto significa, por ejemplo, que puede dibujarse cualquier componente sobre una pantalla de representación visual (*Visual Display Unit*, VDU) y transferir los gráficos por medio de señales eléctricas a través de un cable que lo enlace a un sistema de fabricación, en donde los componentes se puedan producir automáticamente sobre una máquina de control numérico por ordenador. Los sistemas CAD/CAM permiten observar las interacciones existentes entre los diferentes elementos que integran una pieza o un producto, sin necesidad de construir un prototipo.

LECTURA 4: COTAGUA CORTA DE TODO MEDIANTE CHORROS DE AGUA

El sistema, cuya tecnología es de origen alemán, está en el mercado desde hace siete años, pero todavía no es demasiado conocido. Su funcionamiento impresiona. Cotagua estudia primero las piezas que el cliente desea y las diseña en el ordenador para obtener la máxima cantidad de piezas posible en la plancha del material que le entrega el cliente.

Una vez realizado el diseño en el ordenador, se envía la orden a la mesa de corte –de dos metros de ancho por cuatro de largo–, donde un brazo metálico controlado por ordenador dirige el chorro de agua según lo diseñado. El chorro de agua sale a una presión de 3.800 atmósferas y una velocidad que duplica la del sonido –680 kilómetros por segundo– a través de un tubo que se coloca a un milímetro de distancia del material que se desea cortar. Después, el agua corta el material con un margen de error de una décima de milímetro.

Para evitar que el chorro de agua rompa también la mesa de corte, la superficie es de rejilla y está llena de agua, lo

que amortigua la potencia del chorro. Y es que el chorro de agua es capaz de cortar todo tipo de materiales de grosores de hasta treinta centímetros: cristal, corcho, madera, fibra de vidrio, granito, titanio, mármol o acero al carbono, entre otros. Según la dureza del material, Cotagua utiliza un polvo abrasivo que ayuda al corte.

El sistema tiene ventajas: se aprovecha mejor el material, corta no sólo en recto, sino que reproduce diseños con exactitud y no deforma ni temple las piezas, ni cambia su estructura molecular, al no estar sometidas al calor.

Por poner algún ejemplo, el sistema de corte con agua se utiliza en medicina para seccionar órganos humanos –el láser dañaría los tejidos– o en empresas como Bimbo, que realiza el corte de sus rebanadas de pan de molde con este sistema, aunque, en vez de con agua, con aceite de soja que luego recicla.

Fuente: Errea, G. (1997): “Cotagua corta de todo mediante chorros de agua”, *Expansión*, 16 de octubre, p. 12.

Básicamente, las condiciones que deben reunir los sistemas CAD/CAM podrían resumirse en (Hawkes, 1989): (1) el sistema debe ayudar al diseñador a realizar su trabajo mediante realizaciones mutuamente efectivas, es decir, el ordenador debe realizar aquellas tareas en las que es más eficiente que el operador humano, (2) el sistema debe ayudar en todos los procesos, desde el diseño conceptual al control numérico y (3) en la etapa de diseño conceptual, el sistema deberá facilitar una presentación efectiva del objeto diseñado.

La ingeniería asistida por ordenador (*Computer Aided Engineering*, CAE) incluye los siguientes elementos (Hawkes, 1989): (a) procedimientos de gestión asistida por ordenador (*Computer Aided Production Management*, CAPM), (b) procedimientos de planificación de procesos asistida por ordenador (*Computer Aided Process Planning*, CAPP), (c) planificación de proyectos utilizando *software*, (d) diseño de procesos y herramientas asistido por ordenador, (e) desarrollo asistido por ordenador y (f) diseño de la distribución en planta de las fábricas asistido por ordenador (incluyendo simulación robótica gráfica). En la actualidad muchos paquetes de *software* de CAD incluyen elementos de CAE.

La ingeniería asistida por ordenador utiliza métodos matemáticos para estudiar el comportamiento de un objeto, sin necesidad de realizar numerosos y costosos ensayos a partir de determinados prototipos contruidos *ad hoc*. La técnica de análisis de elementos finitos permite conocer aspectos tales como deformaciones, áreas de concentración de esfuerzos y zonas críticas de rotura. Mediante el análisis modal se somete al prototipo, representado en el ordenador, a condiciones muy próximas a las reales, mediante vibraciones de distintas frecuencias, para así evaluar la estabilidad de las estructuras y modificarlas si fuera necesario. Así, pues, el desarrollo de la CAE supone un extraordinario avance en la reducción del tiempo y coste en las tareas de creación de nuevos productos.

La planificación de procesos asistida por ordenador (CAPP) involucra todas las actividades necesarias en la fabricación de un producto. Más específicamente, éstas podrían requerir decisiones tales como: (a) tipos de procesos de fabricación requeridos, (b) secuencia de operaciones, (c) velocidad de máquina, alimentación y tiempos de operación, (d) requisitos de herramientas, (e) disposición de los soportes de piezas y (f) selección de máquinas y circulación de materiales. Un sistema CAPP interactivo, utilizado junto con una base de datos (*Data Base Management System*, DBMS), informatiza la rutina de recopilación de datos, ayuda a automatizar la toma de decisiones de fabricación y permite incrementar la eficacia de los métodos de planificación, mejorando y reduciendo el coste de los programas (Hawkes, 1989). Los programas CAPP facilitan la secuencia del proceso y la preparación detallada de los tiempos de operaciones, así como el cálculo de su coste global, y contribuyen a la coordinación de operaciones, lo que permite alcanzar un flujo continuo de producción.

La función de la gestión de la producción asistida por ordenador (CAPM) es monitorizar y controlar la organización de la producción y los requisitos de materiales del producto fabricado. Un paquete CAPM contiene un cierto número de módulos, que se pueden clasificar en dos categorías (Hawkes 1989): (a) control de materiales –incluyendo control de stocks, lista de materiales, planificación de los requisitos de los materiales, e impresión y seguimiento de órdenes de compras– y (b) control de la producción –incluyendo trabajo en marcha, planificación, documentación de pie de máquina y coste de trabajos–.

El control de programas de producción (*Production Program Control*, PPC) realiza las siguientes tareas: a) ajusta los programas de producción para lograr un equilibrio entre la capacidad disponible y la necesaria para atender la demanda prevista por la empresa y b) optimiza la planificación de las necesidades de materiales, así como el tiempo real de funcionamiento de las máquinas, lo que contribuye a una mejora de la eficiencia productiva.

3.6. Tecnología de grupo

La tecnología de grupo (*Group Technology*, GT) se ha practicado en diversas formas y grados en todo el mundo desde el siglo pasado. Algunos de los conceptos básicos de la tecnología de grupo se han conocido y practicado durante mucho tiempo como parte de la Administración Científica, formulada por Taylor en 1920, si bien su denominación ‘tecnología de grupo’ se debe al soviético Mitrofanov, que la desarrolló en los años cincuenta, con el propósito de crear un sistema para minimizar los tiempos de preparación de máquinas. A lo largo de la década de los 70, diversos trabajos difunden dichos conceptos, aplicándolos tanto a la realización de actividades de fabricación como de diseño (Ham, 1991). La expansión de la tecnología de grupo está, sin embargo, vinculada al progresivo empleo del ordenador en la ejecución y control de las más diversas actividades de producción y consiguiente multiplicación de la información relevante sobre dichas actividades.

La tecnología de grupo consiste en aprovechar las similitudes de las tareas repetitivas y lograr una mayor eficiencia agrupando los problemas análogos, lo que puede hacerse de tres modos (Hyer y Wemmerlöv, 1984):

- a) Realizando a la vez actividades similares, con lo que se evita el desperdicio del tiempo que supone cambiar de una actividad a otra diferente.
- b) Normalizando las actividades relacionadas, con lo que la atención se centra solamente en las diferencias evidentes y se evita la innecesaria duplicación de esfuerzos.
- c) Almacenando y recuperando eficazmente información relacionada con los problemas repetitivos, con lo que se reduce el tiempo de búsqueda de datos y se suprime la necesidad de resolver el problema de nuevo.

La base de la tecnología de grupo es el reconocimiento de que existen similitudes en el diseño y fabricación de partes discretas. A pesar de la tendencia a considerar cada pieza como única, y el hecho de que un examen visual de una población de piezas normalmente no revelará características comunes, las piezas pueden clasificarse en grupos o familias si se identifican sus atributos fundamentales. De esta forma, una ‘familia de piezas’ se puede definir como un conjunto de piezas relacionadas, con ciertas igualdades y similitudes específicas. El problema

que surge de inmediato es sobre cómo agrupar eficientemente las piezas en familias. Existen tres métodos básicos (Ham, 1991): 1) búsqueda visual y manual, 2) análisis del flujo de producción y 3) sistemas de clasificación y codificación.

La búsqueda visual es un método muy sencillo, pero su efectividad es limitada cuando se trata de agrupar un gran número de piezas. El análisis del flujo de producción es una técnica para analizar la secuencia de operación y la trayectoria de la pieza a través de las diferentes tareas a realizar. Las piezas con flujos en común se agrupan e identifican como una familia. De modo similar se agrupan las máquinas y operarios que se utilizan para producir la familia de piezas a fin de formar una célula de fabricación³. Tradicionalmente, los ingenieros realizaban manualmente un gráfico de flujo de piezas cuya elaboración resultaba compleja. El gráfico representa en una matriz las piezas que se deben fabricar y las máquinas utilizadas en la transformación. A continuación, los ingenieros agrupan a mano las familias de piezas con un proceso común (Figura 6).

FIGURA 6: GRÁFICO DE ANÁLISIS DE FLUJO DE PRODUCCIÓN

Narasimhan *et al.* (1995)

(a) Sin selección

		<i>Número de pieza</i>							
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
Número de máquina	1	X					X		
	2		X	X		X			X
	3			X		X			X
	4				X				
	5	X					X		
	6		X	X		X			
	7	X			X		X		

(b) Con selección

		<i>Número de pieza</i>							
		<i>1</i>	<i>6</i>	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>7</i>
Número de máquina	1	X	X						
	5	X	X						
	7	X	X				X		
	2			X	X	X		X	
	6			X	X	X			
	3				X	X		X	
	4						X		

Con la llegada de los ordenadores, la esencia de la tecnología de grupo es la base de datos informatizada que sirve para el almacenamiento y rápida recuperación de la información sobre

³ Una célula de fabricación es un grupo de máquinas que producen una familia de piezas o componentes que tienen diseños o requerimientos de procedimientos similares.

las piezas. Por tanto, su expansión está subordinada al empleo extensivo del ordenador en la industria (Hawkes, 1989). Una base de datos de GT es un sistema de archivo informatizado que acelera la recuperación de la información sobre las piezas, facilita el proceso de diseño, mejora la exactitud de la planificación del proceso, ayuda a la creación y manejo de células de fabricación y mejora la comunicación entre las áreas funcionales (Hyer y Wemmerlöv, 1984).

El máximo rendimiento de la tecnología de grupo se obtiene a través de un sistema formal de codificación, por el que cada pieza recibe un código numérico o alfanumérico, que describe los atributos más relevantes. Es decir, a cada pieza se le asignan unos símbolos que representan una información pertinente. Para alcanzar la máxima utilidad, el código debe ser capaz de describir la pieza, tanto desde el punto de vista del diseño como del de la fabricación. Una vez que las piezas han sido codificadas, se impone la clasificación, la cual significa tan sólo la agrupación de piezas de características similares. Están disponibles diversos sistemas de clasificación y de codificación comercial de GT para aplicaciones en diseño y fabricación, pero aún no existe un sistema generalmente aceptado. Cuando los ingenieros clasifican las piezas y asignan las que tienen atributos estrechamente relacionados a una familia en particular, pueden determinar similitudes entre los elementos de diversas maneras. Desde el punto de vista del diseño, por ejemplo, la similitud puede estribar en las formas geométricas y las dimensiones. Desde el punto de vista de fabricación, la similitud entre dos piezas significa que se elaboran en la planta mediante un procedimiento idéntico o muy semejante (Hyer y Wemmerlöv, 1984).

LECTURA 5: TECNOLOGÍA DE GRUPO

El Grupo Aeroespacial de VSI Corporation, que fabrica tuercas para motores, compró barras cortadas en bruto basadas en la demanda por el número de las piezas. Mediante un sistema de codificación, la empresa averiguó que podía comprarse un número menor de piezas distintas en volúmenes mayores, lo que dio lugar a una reducción media del precio de compra por unidad de 22 a 20 centavos. Esta pequeña reducción por unidad, multiplicada por los 4,8 millones de piezas compradas al año, produjo un ahorro anual de 96.000 dólares.

En el campo de las ventas la GT tiene también interesantes aplicaciones. La misma empresa recibió un pedido urgente de un tornillo para motor que no figuraba entre la partida de existencias habituales. Tras investigar en la base de datos de GT, sin embargo, se descubrió una pieza alternativa que satisfacía las necesidades del cliente y que podía entregarse a punto.

Fuente: Hyer, N. L. y Wemmerlöv, U. (1984): "Group technology and productivity", *Harvard Business Review*, vol. 62, nº 4, julio-agosto, pp. 140-149.

La tecnología de grupo permite agrupar las partes por familias que requieren una estructura de producción similar, lo que reducirá el tiempo dedicado a la preparación de máquinas y herramientas. Es decir, las máquinas utilizadas en la fabricación de familias de piezas similares se agrupan secuencialmente formando una célula de fabricación. Esto facilita que, cuando haya que organizar las máquinas para fabricar un componente del que ya no se tienen existencias, se pueda comprobar si hay stocks de los otros componentes que requieren una organización de las máquinas similar y, así, proceder o no a su fabricación. Lógicamente, para hacer esta comprobación se necesita conocer qué componentes requieren una organización similar de máquinas.

La codificación de las piezas es útil para la recuperación eficaz de diseños anteriores, así como para la estandarización de todos ellos. Estas características contribuyen a acelerar el proceso de diseño y reducir su proliferación excesiva. La estandarización no significa que todas las piezas

con una misma función deban ser idénticas. Significa, por el contrario, que se establecen normas para las tolerancias, dimensiones, ángulos y otras especificaciones (Hyer y Wemmerlöv, 1984).

El sistema de extracción de datos de diseño que se elige mediante la agrupación de una familia de piezas proporciona los siguientes aspectos importantes, que ayudan significativamente a la racionalización del trabajo (Ham, 1991):

- Agrupación de una familia de piezas para la racionalización del diseño.
- Disponibilidad de la información sobre el diseño existente para utilizar en nuevas aplicaciones, modificaciones y referencias.
- Estandarización de las características, especificaciones y materiales del diseño.
- Eliminación de diseños duplicados.
- Disminución del coste efectivo de nuevos diseños.

Un ejemplo sobre el funcionamiento de la tecnología de grupo en el campo del diseño se representa en la **Figura 7**. En ella se aprecia cómo para hacer un diseño (bloque 1) utilizando dicha tecnología (bloque 7) se busca en la base de datos aquél lo más parecido posible (bloque 2). Éste se somete a una serie de operaciones y transformaciones hasta llegar al diseño deseado (bloque 3). El nuevo diseño pasa a formar parte de la base de datos, de modo que pueda volver a emplearse en la tecnología de grupo (bloque 7). Con la información obtenida para realizar el nuevo diseño (bloque 5), se establecen operaciones a las que hay que someter la pieza de partida para obtener la pieza deseada (bloque 6). Finalmente, la pieza obtenida se somete a verificación (bloque 4). Al no tener que partir de cero y existir para cada familia unos procesos de fabricación, se consigue aumentar la productividad en el desarrollo del diseño (ADAMICRO, 1986).

ADAMICRO (1986)



Wemmerlöv, 1984).

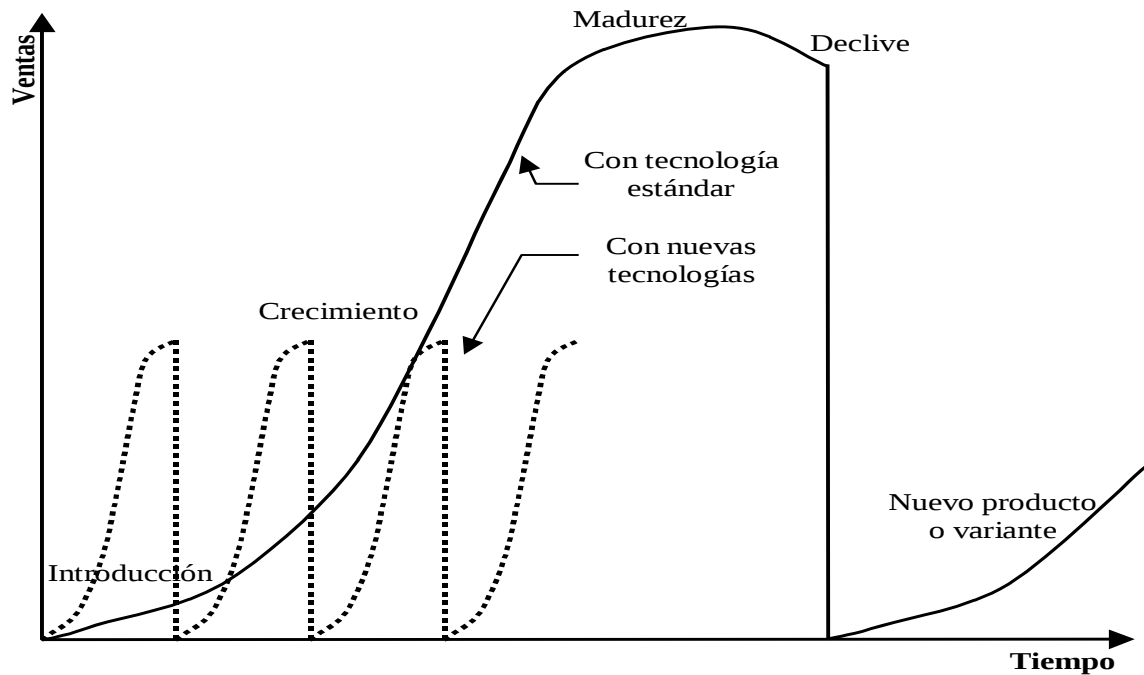
con precisión las familias de componentes y los requisitos de las series de producción.

AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

vida de los productos (**Figura 8**).

FIGURA 8: REDUCCIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO OCASIONADA POR LAS

NUEVAS TECNOLOGÍAS Meredith (1987)



La tecnología moderna permite innumerables variaciones en los productos a través de diferentes combinaciones del mismo grupo básico de componentes. Como consecuencia, pierden interés las economías de escala a favor de las economías de variedad (alcance). Por otra parte, la falta de aprendizaje de las máquinas (ausencia de efecto experiencia) provoca que las únicas reducciones de costes posibles originadas por la introducción de estas nuevas tecnologías se deban a las mejoras realizadas en los programas del ordenador, que son mínimas.

La automatización permite fabricar productos en pequeños lotes e, incluso, bajo pedido. De esta forma, elimina los stocks y permite planificar y programar la producción a corto plazo, con lo que reduce la incertidumbre del futuro y facilita la rápida adaptación a los cambios del entorno.

Las tecnologías de la información requieren estructuras organizativas flexibles, con amplias dosis de descentralización en la toma de decisiones, énfasis en el trabajo en equipo, personal altamente cualificado, liderazgo cooperativo y motivador, inversiones en formación y sistemas de compensación adecuados. En la **Figura 9** se recogen las principales diferencias existentes entre un sistema de producción en masa y un sistema de producción en el que se han incorporado las nuevas tecnologías de la información.

FIGURA 9: CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO PRODUCTIVO EN MASA Y DE LA AUTOMATIZACIÓN

Adaptado de Nemetz y Fry (1988); Goldhar y Jelinek (1983); Adler (1988)

Características	Producción en masa	CIM
<i>Estrategia</i>	• Liderazgo en costes • Economías de escala • Efecto experiencia	• Diferenciación • Economías de variedad • Flexibilidad
<i>Producto</i>	• Ciclo de vida largo • Estandarización • Demanda estable	• Ciclo de vida corto • Personalización • Demanda variable
<i>Producción</i>	• Grandes lotes • Elevadas existencias • Instalaciones gran capacidad • Muchos proveedores por producto • Eficiente	• Pequeños lotes • Existencias mínimas • Instalaciones pequeña capacidad • Pocos proveedores por producto • Eficaz
<i>Organización</i>	• Burocrática (o mecánica) • Tramo de control reducido • Estructuras piramidales • Toma de decisiones centralizada • Liderazgo controlador	• Orgánica • Tramo de control amplio • Estructuras planas • Toma de decisiones descentralizada • Liderazgo motivador e integrador
<i>Trabajadores</i>	• Alta especialización • Escasa formación • Trabajo individual • Habilidades manuales • Ejecución de tareas • Compensación individual	• Baja especialización • Elevada formación • Trabajo en equipo • Habilidades cognitivas • <i>Empowerment</i> • Compensación al equipo

La automatización exige disponer de trabajadores muy cualificados, que sepan manejar una avalancha creciente de información y puedan trabajar en un medio que requiere, a la vez, división de tareas y cooperación, al tiempo que son capaces de pensar en términos abstractos y resolver problemas complejos. Un grupo de personas, en suma, con: a) capacidad para seleccionar y extraer los datos relevantes de un volumen amplio de información, b) capacidad de comunicación, c) forma de pensar sistémica, capaz de buscar las interrelaciones y de integrar nuevos hechos en lo ya conocido, d) flexibilidad para aplicar los conocimientos a situaciones nuevas y desconocidas y e) voluntad de aprender. El estado de desarrollo continuo de las tecnologías hace que sea esencial la disposición constante a adquirir nuevos conocimientos.

Para Mallet (1975) la automatización: a) debilitó el trabajo a destajo e impulsó el sistema de incentivos al equipo, b) generó cualificaciones específicas y no ocupacionales de cada industria y c) incrementó la seguridad en el empleo, porque la creciente necesidad de capital humano exigía estabilidad laboral. La automatización invirtió la tendencia de la producción en masa a la fragmentación del trabajo, la descualificación, la alienación y la subordinación del trabajador al ritmo de la máquina o a la disciplina de trabajo rutinaria.

En resumidas cuentas, la automatización aporta las siguientes ventajas competitivas (**Figura 10**):

- Productos personalizados y acomodados a los deseos de los clientes a unos costes aceptables, con una segmentación más afinada.
- Extensas familias de diseño del producto, cuya variedad irá creciendo.

- Se acorta el tiempo de diseño de los nuevos productos, lo que conlleva una disminución de su ciclo de vida. Además, durante el diseño se tienen en cuenta los costes de producción, y es posible alcanzar economías mucho mayores.
- Respuesta rápida a los cambios de la demanda.
- Mayor precisión y capacidad de repetición de los procesos, lo que reduce la variabilidad del proceso y favorece una mayor calidad de los productos.
- La simulación por ordenador puede ser mucho más rápida y menos costosa, y casi tan segura como las pruebas de producto real.
- Adaptabilidad (integración), es decir, se pueden interconectar con otras máquinas para ejecutar y coordinar una operación de fabricación.
- Un ciclo de producción más corto, debido a un menor tiempo de preparación de máquinas –es poco más que la lectura de un programa de ordenador– y a la eliminación de tiempos de espera para la transformación de productos.
- Reducción del número de máquinas en la operación. Se integran las actividades en menos máquinas más complejas.
- Desaparece el efecto aprendizaje, ya que la máquina es igual de eficiente en la fabricación de la primera unidad que en la fabricación de las siguientes.
- Aumentan las tasas de utilización de las máquinas y disminuyen los costes de fabricación. En un taller pequeño las máquinas-herramienta permanecen ocupadas un escaso 6 por ciento del tiempo. Esta tasa aumenta al 22 por ciento en una gran empresa. Sin embargo, un FMS tiene una tasa de utilización del 40 por ciento y puede subir al 60 por ciento (Ayres y Butcher, 1993).
- Repetición de los procesos de diseño y fabricación a través del almacenamiento de datos.
- Publicidad y promoción que resaltan más la capacidad del proceso de producción –calidad y tiempo de entrega– que las características de diseño de los productos.
- Un acusado enfoque hacia el capital humano como base de la competitividad de la empresa.
- Mayor seguridad para el trabajador, al suprimir los trabajos peligrosos.
- Eliminación de los puestos menos cualificados y reducción del estrés y los problemas físicos de ciertos puestos.
- Agrupa operaciones para que las tareas que antes se hacían en secuencia se puedan realizar ahora de forma simultánea.
- Menor posibilidad de error humano y de las consecuencias de su falta de fiabilidad. En condiciones normales, los sistemas automatizados de montaje pueden alcanzar niveles de perfeccionamiento inalcanzables por los sistemas de montaje manuales.
- Se introducen cambios en las tareas asociadas con las nuevas tecnologías, tales como la combinación de ciertos grupos de cualificaciones.
- Menos desperdicios (menos existencias y trabajos en curso) y unos costes de mantenimiento más predecibles.

FIGURA 10: BENEFICIOS Y RIESGOS DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS
Meredith (1987)

Tecnología	BENEFICIO											
	Flexibilidad	Calidad	Tiempo de respuesta	Tiempo de ciclo	Menos trabajo	Menos inventarios	Menos espacio	Imagen	Capacidad	Seguridad	Coste	Riesgo
NC, CNC, DNC.....	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+	-	
Robots.....	++	++		+	++	+	+	++	+	++		
Tecnología de grupo...		+	++	++	+	++			++		-	
CAD.....	++	++	++		++			++			-	
CAE.....	++	++	++		++			+			-	
CAPP.....	++		++		++						-	
CAM.....	++	++	+	+	++	+	+	++	++	+	-	-
AS/RS.....			+	+	+	+	++	++	+	+	-	-
MRP II.....			+	++	+	+			++		-	-
FMS.....	++	++	+	++	++	+	++	++	++	+	-	-

- + Una ventaja sobre la tecnología actual
- ++ Una ventaja significativa sobre esa tecnología
- Un coste negativo o riesgo de la tecnología
- Un coste o riesgo significativo

La automatización cambia el terreno de la competencia, trasladándolo de la fabricación a la ingeniería, de la explotación de la planta a su planificación. La ingeniería es ahora la función de línea más decisiva. En comparación, la fabricación ha pasado a desempeñar una función de apoyo (Jaikumar, 1986).

Por otra parte, la disponibilidad de controles electrónicos y de máquinas programables forzará a la dirección de las empresas a considerar no sólo el impacto de la estrategia competitiva en las decisiones de producción, sino, también, el impacto de las decisiones de producción en las opciones estratégicas de la empresa (Goldhar y Jelinek, 1983).

4.1. Puesta en práctica de la automatización

El éxito de la automatización requiere un enfoque de tres fases (Huge y Anderson, 1988): simplificación, automatización e integración. La puesta en práctica de las nuevas tecnologías sin llevar a cabo previamente una simplificación del proceso de fabricación suele culminar en fracasos estrepitosos. El enfoque de una rápida solución técnica, es decir, el intento de resolver los problemas ocasionados por la intensa competencia industrial aplicando la alta tecnología a un sistema de producción ineficiente, no funciona. Además, automatizar un sistema ineficiente es mucho más difícil que automatizar uno que se ha simplificado y mejorado previamente. De acuerdo con Bessant (1991), “en promedio, el 40 por ciento de los beneficios pronosticados para un FMS se pueden lograr, o se han logrado, antes de instalarlo. Esto se debe a que el proceso de planificación detectó prácticas y costumbres que se pueden corregir sin inversión adicional”. Por otra parte, las posibilidades reales de la automatización residen en su capacidad para integrar las operaciones adyacentes entre sí y con los sistemas globales de control. Las nuevas tecnologías deben integrarse en la estructura productiva de la empresa, ya que la automatización es una tecnología contagiosa que hace posible la obtención de beneficios cada vez mayores a medida que se integran nuevos centros de fabricación (Gold, 1982). Se trata de evitar las ‘islas de automatización’ desconectadas, promoviendo la integración de todo el proceso. Puesto que el 60 por ciento o más de los

materiales que se utilizan en una fábrica moderna se adquieren en el mercado, la automatización mejorará su productividad si se acopla con una red de proveedores capaz de entregar justo a tiempo piezas y componentes de alta calidad.

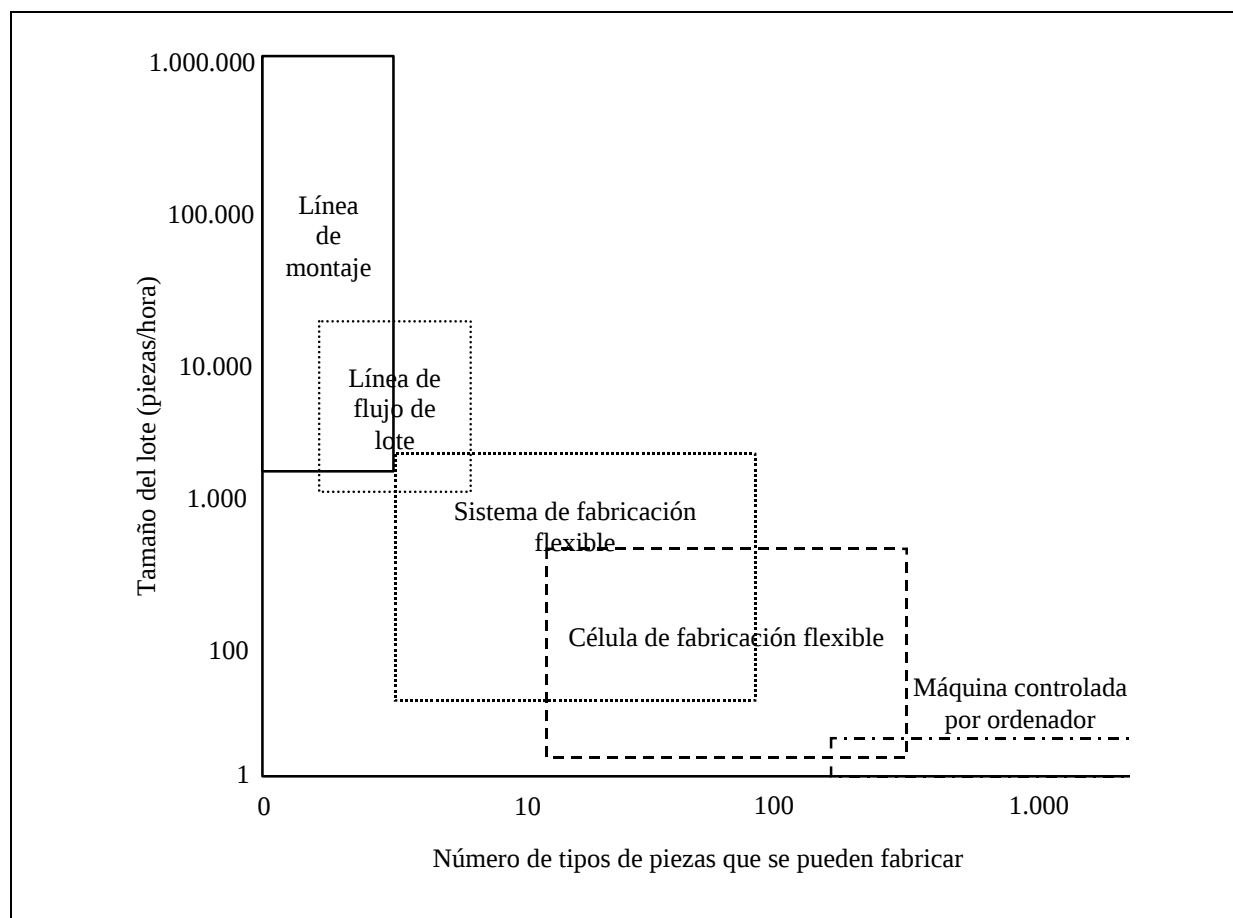
Uno de los factores cruciales que determinan el éxito o fracaso en la aplicación de la automatización industrial es el apoyo que proporciona el fabricante de los equipos al usuario. Este apoyo incluye formación de operarios y personal de apoyo, asesoramiento detallado sobre los problemas mecánicos y logísticos de las aplicaciones concretas, así como prestación de servicios de mantenimiento (Fleck, 1983). Ahora bien, en la mayoría de los casos, el fabricante que desarrolla, por ejemplo, un sistema de fabricación flexible lo abandona después de su puesta en práctica en la empresa cliente y lo deja en manos de los técnicos de la misma. Estos últimos suelen mostrarse reacios a introducir modificaciones, lo que dificulta la explotación correcta de la nueva tecnología. De ahí que sea más razonable que el personal de la empresa cliente participe en el proceso de diseño e implantación de los sistemas de fabricación flexibles. Así, estarán involucrados en el éxito de éstos desde el principio y se sentirán motivados para introducir cambios continuamente y, de esta forma, ampliar su campo de acción (Jaikumar, 1986). Es precisamente este aprendizaje lo que origina y mantiene la ventaja competitiva.

En ningún caso las decisiones relacionadas con la automatización (aunque sea parcial) del sistema productivo han de tomarse al nivel de técnicos y jefes de operación (Gold, 1982). Deben formar parte del esfuerzo estratégico para potenciar la eficiencia y la flexibilidad empresarial y suponen un compromiso fundamental a largo plazo por parte de la empresa. El proceso de automatización ha de planificarse en su totalidad, aunque a corto plazo sólo pueda desarrollarse de forma parcial. Así, pues, para que la automatización tenga éxito, la alta dirección debe considerar a la fábrica como un sistema y aplicar la Teoría de Sistemas para su diseño, creación y mantenimiento.

Las nuevas tecnologías, si se introducen en un sistema de producción en masa, aumentan la variedad del producto, mientras que, si por el contrario, se automatiza un sistema de producción artesanal, la variedad alcanzada por el nuevo sistema productivo disminuye (**Figura 11**).

FIGURA 11: EFICIENCIA, FLEXIBILIDAD E INTRODUCCIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Ayres y Butcher (1993); Rembold *et al.* (1993)



Los sistemas modernos de fabricación utilizan cinco tecnologías básicas de producción que hacen diferentes intercambios entre productividad (que se expresa aquí en términos de producción por hora) y flexibilidad, o variedad de producción que se puede elaborar de acuerdo con la demanda. La línea de montaje consiste en máquinas especializadas de construcción especial y un sistema de transporte continuo. Alcanza una tasa más elevada de producción anual que las demás tecnologías, pero a costa de la flexibilidad. En el otro extremo se halla la máquina de control numérico por ordenador, que se puede programar para producir casi cualquier contorno de superficie deseado. Es muy flexible, pero su productividad es mucho menor, en gran parte a causa del tiempo de puesta en marcha necesario para cambiar de un producto a otro. La célula de fabricación flexible consta de varias máquinas controladas por ordenador, que desarrollan diversas operaciones de mecanizado sobre la misma pieza, que se transfiere de una a otra máquina por un dispositivo especial de puesta en marcha o robot. El sistema de fabricación flexible es parecido y agrega un sistema de transporte. Por último, una línea de flujo de lotes es un sistema flexible que fabrica piezas que han sido agrupadas para minimizar el tiempo de puesta en marcha. Como sugiere la figura, cada tecnología tiene su lugar: la mejor tecnología para el trabajo depende del número de piezas que se pretende fabricar.

Asimismo, la incidencia de la introducción de las nuevas tecnologías en la productividad del trabajo depende del nivel de mecanización previo de los sistemas productivos en los que se incorporan estas nuevas tecnologías. La mejora en la eficiencia del trabajo es tanto más fuerte cuanto más débilmente mecanizados estén los sistemas productivos (Tarondeau, 1987), y disminuye si el proceso está totalmente mecanizado (producción en masa).

Una vez introducidas las nuevas tecnologías de la información, la organización burocrática

parece predominar en los sistemas orientados hacia la producción en masa y la estructura orgánica en los sistemas que producen series pequeñas o bajo pedido (Kohler y Schultz-Wild, 1985). Esto quiere decir que, en cierta medida, se conserva la organización tradicional, como puede corroborarse analizando la situación en dos países tan representativos como Estados Unidos y Japón. En el primero prevalecía la estructura jerárquica y se mantiene después de la introducción de las nuevas tecnologías de la información. En las empresas japonesas, sin embargo, más dadas a estimular la cooperación entre los trabajadores, se fomenta la rotación en la ejecución de las tareas –abarcando actividades tan dispares como programación o carga/descarga–, a lo que se añade una formación continua y una alta cualificación profesional. Mantienen, una vez introducidas las nuevas tecnologías, una estructura orgánica.

LECTURA 6: PUESTA EN PRÁCTICA DE UN ROBOT

Una división de Westinghouse utilizó un plan ideal de educación y formación para aplicar robots en la fábrica. Tras difundir a través de los medios de comunicación no oficiales, la noticia de la próxima llegada de robots a la fábrica, sus directivos se reunieron con los dirigentes sindicales y les pusieron oficialmente al corriente de la decisión de la empresa de instalar un robot para ejecutar trabajos de soldadura. Durante la primera reunión, los directivos de la división expusieron la necesidad de que la empresa continuase siendo competitiva y mantuviese su participación en el mercado. La dirección de la fábrica calificó de ‘interesada’ la reacción de los sindicatos. Éstos deseaban conocer cuántos trabajadores serían desplazados de sus puestos de trabajo por la máquina. Los responsables empresariales expusieron su reafirmación de una política de exclusión de despidos por causa del proceso tecnológico, y señalaron que no se produciría reducción alguna de la plantilla por el sistema de despidos (La empresa y el sindicato local tenían un compromiso serio y constructivo que había evitado las huelgas desde 1950 y los despidos desde 1972).

El siguiente paso fue la proyección de cintas de ‘video’ proporcionadas por los propios fabricantes de robots. La dirección informó a los líderes sindicales de cómo estaba probándose el robot antes de ser instalado, y sugirió que la empresa permitiera la elección de un operario que, trabajando en los laboratorios de Investigación y Desarrollo en la central de la empresa, aprendiera como funcionaba el robot. Los sindicatos aprobaron la idea, y un soldador joven permaneció seis semanas trabajando con el robot mientras éste estaba siendo preparado. Durante el mencionado período, los directivos de la empresa estuvieron en contacto con el operario y tomaron notas de sus sugerencias acerca del robot. La dirección trató de mantener a los dirigentes sindicales informados de todo detalle importante del proceso de desarrollo, haciendo énfasis en los resultados positivos que esta tecnología aportaba a los trabajadores.

El paso final de esta división de Westinghouse es el más impresionante. Destacados dirigentes locales de la empresa y dirigentes sindicales volaron a Japón en un viaje de dos semanas de duración para ver en fábricas japonesas cómo trabajaban los robots. Uno de los propósitos del viaje era mostrar a los dirigentes sindicales la competencia a la que tenía que hacer frente la industria americana en general, y Westinghouse en particular. Según la empresa, el viaje reforzó la comprensión de los sindicatos del hecho de que el futuro de la empresa dependía del incremento de la productividad por medio del uso de robots o de otras nuevas tecnologías.

Fuente: Foulkes, F. K. y Hirsch, J. L. (1984): “People make robots work”, *Harvard Business Review*, enero-febrero, pp. 94-102.

La automatización está asociada a una mayor descentralización en la toma de decisiones, pero también a una mayor formalización (Dean *et al.*, 1992). La descentralización es necesaria y posible debido a que los operarios tienen un mayor acceso a la información computerizada y tienen la profesionalidad necesaria para ejecutar decisiones. Sin embargo, este mismo sistema también requiere una mayor formalización para contrarrestar el riesgo y la incertidumbre resultante de la descentralización. En otras palabras, los ordenadores nos permiten agrupar y utilizar más información para establecer líneas de conducta, que se utilizan para coordinar las unidades descentralizadas.

Los efectos de las nuevas tecnologías sobre los trabajadores –disminución de los operarios directos, aumento de las cualificaciones, enriquecimiento del puesto y trabajo en equipo–, no están muy claros. En este sentido, existen dos posturas contrapuesta –contraria y a favor de la automatización–, en función de los efectos negativos y positivos, respectivamente, que ésta provoca sobre el personal.

Por un lado, los detractores de la automatización de los sistemas productivos consideran que ésta implica la interposición de elementos artificiales entre el trabajador y el producto, que mediatizan sus relaciones e incrementan la separación, en todos los sentidos del término, entre las personas y el resultado de su trabajo. Además, consideran que la automatización contribuye al proceso de descualificación del trabajador, mediante una inhibición progresiva de sus capacidades de iniciativa, de comprensión y de conceptualización (Braverman, 1974). Por último, defienden que las nuevas tecnologías generan tensión y desconfianza entre los trabajadores, por temor a la necesidad de reciclaje total de sus cualificaciones (las cualificaciones que poseen pierden utilidad y temen no ser capaces de dominar las nuevas tecnologías) y, fundamentalmente, temen que su labor resulte innecesaria y pierdan su puesto de trabajo (OIT, 1987). En este sentido, quizás el problema más grave afecta a los supervisores de primera línea, ya que su función tiende a desaparecer al alcanzar las máquinas grados máximos de fiabilidad y autonomía.

Por el contrario, los defensores de la automatización consideran que no se han cumplido las expectativas de alejamiento humano de las tareas de producción surgidas con la introducción de las nuevas tecnologías. Afirman que cada nueva tecnología crea nuevos problemas que, a su vez, requieren personal para su resolución, lo que provoca que no se produzca una reducción de personal, sino un cambio en el perfil de las tareas a realizar (Reader, 1982). De esta forma, las nuevas tecnologías permiten sustituir a los operarios en la realización de tareas insalubres y que requieren escasa cualificación. En contrapartida, los trabajadores, además de responsabilizarse de los sistemas de control cuando se produzcan fallos imprevisibles, han de asumir cada vez más su supervisión cuando se prepara un nuevo diseño del *hardware* y del *software* para fabricar nuevos productos de forma distinta y con inputs diferentes (Hirschhorn, 1984). La vigilancia de un sistema de control no debe considerarse como un período de inactividad mental, esperando el acontecimiento del fallo, sino que se trata de una búsqueda constante de información acerca del proceso, con objeto de prevenir el fallo y anticiparse a él (Daniellou *et al.*, 1982). En este sentido, las nuevas tecnologías sustituyen el ejercicio de la habilidad manual del operario por el de la capacidad de abstracción. Dado que el desarrollo del *software* es el centro de este proceso de fabricación que utiliza la información de forma cada vez más intensiva, el adiestramiento tecnológico de los empleados de la empresa tiene una importancia decisiva (Jaikumar, 1986).

LECTURA 7: LA APLICACIÓN DE LA ROBÓTICA PRODUJO CAÍDA EN EL EMPLEO

La introducción de la robótica en los procesos industriales supuso un importante descenso del número de mano de obra, sobre todo en el sector automovilístico, donde en 1990 se instalaban uno de cada dos robots en funcionamiento. Sin embargo, a partir de ese mismo año la demanda empezó a disminuir. Los expertos aseguran que los motivos son la saturación del mercado y los costes de mantenimiento.

La aplicación de la robótica a la producción industrial provocó la pérdida de numerosa mano de obra, sobre todo en el sector del automóvil, donde a finales de los años 80 se instalaban uno de cada dos robots aplicados a la industria. La empresa Peugeot, por ejemplo, se vio obligada a reducir en 700 personas su plantilla en la fábrica de Poissy tras aplicar esta tecnología en 1991 y Renault recortó el número de sus empleados en Flins para instalar nuevos robots que facilitarían la fabricación del nuevo Twingo. Por su parte, Peugeot Citroën ha anunciado este año que eliminará 2.250 empleos.

Las empresas, sin embargo, afirman que lo que se está produciendo es un cambio en las necesidades de mano de obra de la empresa. Si por un lado se están perdiendo empleos, por otro se necesita la incorporación de personal cualificado que se dedique al mantenimiento y control de la maquinaria. Además, estas transformaciones responden a un proceso normal de modernización industrial.

Al principio de su aplicación, la robótica se consideraba una alternativa a la utilización de la mano de obra. Sin embargo, hoy se ha demostrado que el máximo rendimiento en la productividad se consigue con la armonización de los recursos humanos y tecnológicos.

Una de las grandes transformaciones que supuso la aplicación de la robótica ha sido, además de su influencia en el mercado laboral, la necesidad de ampliar la formación de los empleados de las industrias que debían aprender el manejo y control de la maquinaria instalada.

Fuente: La Gaceta de los Negocios(1993): “La aplicación de la robótica produjo caída en el empleo”, *La Gaceta de los Negocios*, 3 de julio, p. 40.

Por razones tecnológicas, es conveniente la introducción gradual de la automatización, para que los ingenieros puedan descubrir los puntos fuertes y débiles de cada nueva tecnología introducida y realizar los ajustes oportunos. También es una razón convincente para los que han de dirigir los recursos humanos, porque alivia los temores de los operarios (Foulkes y Hirsch, 1984).

4.2. Barreras a la automatización

A pesar de las ventajas que presenta, la automatización se ha introducido en la industria con mayor lentitud de lo que parecía, quizás porque las máquinas automáticas son más caras que las convencionales o, tal vez, por la escasa estandarización de los procesos productivos a las que son aplicables, amén de otra serie de barreras que deterioran las potencialidades competitivas de estas tecnologías contribuyendo a su fracaso (**Figura 12**).

FIGURA 12: BARRERAS, CAUSAS Y SOLUCIONES A LA PUESTA EN PRÁCTICA DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS
Beatty y Gordon (1988)

BARRERAS	CAUSAS	REMEDIOS
Estructurales		
Excesiva atención sobre el trabajo directo y las ratios	Criterios de decisión obsoletos	Análisis cuidadoso de los costes y beneficios reales
Fracaso en la percepción de los beneficios reales	Ausencia de indicadores de beneficio intangibles	Análisis de la productividad total y de los ‘intangibles’
Alto riesgo para los directivos	Los sistemas de incentivos desaconsejan la toma de riesgos	Diferentes sistemas de incentivos para los directivos
Ausencia de coordinación y de cooperación	Fragmentación organizativa	Mecanismos para integrar y coordinar
Altas expectativas y costes ocultos	Expectativas de resultados superiores a lo que realmente se puede lograr	Planificación de los objetivos estratégicos
Humanos		
Elevada incertidumbre	Miedo a los cambios e incertidumbre	Implicación y comunicación
Resistencia	Miedo a pérdidas de poder y de estatus	Puesta en práctica cuidadosa. Defensa del proceso
Decisiones apresuradas y actitud luchadora crónica	Orientación de la acción: actitud impaciente respecto a la planificación y la espera	Planificación previa a la puesta en práctica. Objetivos a largo plazo
Técnicos		
Incompatibilidad de los sistemas	Compra de varios tipos de <i>hardware</i> y <i>software</i>	Comprar un único sistema integrado. Escribir nuestros propios programas. Ficheros neutrales

La principal barrera para la aplicación efectiva de las nuevas tecnologías es la falta de comprensión de su impacto estratégico: personalización de la oferta (Goldhar y Jelinek, 1983). En este sentido, la tendencia de las empresas a utilizar los sistemas automáticos como una máquina más, utilizada para la producción a gran escala de un número reducido de unidades, en lugar de para la producción muy variada de muchas piezas a un coste unitario bajo, reduce su potencial estratégico (Jaikumar, 1986) a la par que genera unas falsas expectativas en el ahorro en costes..

Los sistemas de compensación vigentes en la mayoría de las empresas provocan que los directivos se concentren en objetivos financieros a corto plazo, mientras que los resultados de las nuevas tecnologías se producen a medio y largo plazo. Ello hace que pospongan este tipo de decisiones, que suele menguar la cuenta de resultados inmediata. Ahora bien, las inversiones en automatización no sólo deben analizarse desde la perspectiva de los indicadores financieros, sino también desde la base de su contribución a los esfuerzos de la empresa para lograr la misión.

A medida que la asignación de los costes de fabricación y de los gastos generales depende cada vez más de los precios internos de transferencia, los métodos tradicionales de contabilidad son también, progresivamente, menos útiles (Goldhar y Jelinek, 1983), y no

proporciona una información veraz, lo que, evidentemente, distorsiona la toma de decisiones favoreciendo las tecnologías tradicionales.

La evidencia sugiere que, a menos que una empresa adopte primero una estructura orgánica, es probable que fracase su conversión a la automatización. Los cambios culturales y organizativos deben preceder en lugar de seguir –o, por lo menos, acompañar– los cambios tecnológicos (Jaikumar, 1986). Además, en ocasiones se sostiene que el mantenimiento de las organizaciones burocráticas, tras la introducción de las tecnologías de la información, provoca un deterioro de la productividad, lo que repercute desfavorablemente en la difusión de las tecnologías en la industria (Kohler y Schultz-Wild, 1985). Las fábricas con alta tecnología organizadas de modo inadecuado terminan añadiendo tantos trabajadores indirectos técnicos y de servicio como trabajadores directos no cualificados eliminan de las tareas manuales de montaje (Womack *et al.*, 1990).

El análisis de las tareas es esencial para planificar la transición de un proceso manual a un proceso automático. Las empresas que tienen éxito en la automatización de sus instalaciones habían analizado tanto la capacidad técnica de los trabajadores para llevar a cabo el proceso de producción existente como la de aquéllos que intervendrían en el funcionamiento de las máquinas automáticas. Los conocimientos para desempeñar ambos puestos de trabajo son muy diferentes (Foulkes y Hirsch, 1984).

El aspecto más perturbador de la automatización es el papel clave que tiene el *software* y las decisiones acerca de éste. Puesto que el *software* incorporará la ‘base de conocimientos’ de la empresa, ponerlo por escrito será una tarea de alto riesgo, ya que puede ser accesible a los competidores (Ayres y Butcher, 1993). Por otra parte, las empresas no proporcionan apoyo a la mejora del *software*, lo que limita su potencial.

La escasez de inversiones en formación para conseguir aumentar las capacidades de los empleados y su conocimiento de los nuevos sistemas es una barrera importante a la automatización, ya que ésta exige que los trabajadores sean polivalentes. Los trabajadores que antes podían haber manejado un torno de alta velocidad, ahora deben ser capaces de manejar, e incluso programar, tres o más máquinas de control numérico por ordenador, y también pueden estar autorizados para tomar decisiones de mantenimiento o suministros. En estas circunstancias, puede ser contraproducente pensar en los trabajadores como un factor variable, en lugar de activos valiosos (Ayres y Butcher, 1993).

Las nuevas tecnologías, al igual que la introducción de cualquier innovación en la empresa, generan un cierto rechazo, ya que se tiene miedo a la alteración del *statu quo*. En este sentido, las nuevas tecnologías generan tensión y desconfianza entre los trabajadores, porque temen perder el puesto, no ser adiestrables o que las cualificaciones que poseen pierdan funcionalidad. Los mandos intermedios son una barrera mayor que los trabajadores, ya que con frecuencia son dejados de lado por la alta dirección: no reciben preparación adecuada o no se les mantiene al corriente de los acontecimientos.

Hay que resaltar que la incompatibilidad de los sistemas, al tener cada fabricante sus propias normas, no contribuye a su difusión en el mercado, máxime si tenemos en cuenta que muchos fabricantes son los propios usuarios. Esto ocurre con General Motors y otras empresas automovilísticas. La integración a nivel más bajo está retrasada respecto de la integración a

niveles superiores. Es menos probable que los grupos de máquinas en el taller puedan intercambiar información a que lo hagan las unidades organizativas de corporaciones de plantas y productos múltiples. En especial, todavía es raro que los sistemas CAD impulsen directamente al FMS u otros sistemas de producción (Ayres y Butcher, 1993).

ANEXO: INTELIGENCIA ARTIFICIAL⁴

El proceso de decisión en la empresa se está complicando cada vez más debido a la gran cantidad de datos que se deben manejar. En el momento en que una persona hace una operación tan sencilla como extraer dinero de un cajero o efectuar una simple compra, los detalles de esas transacciones quedan almacenados automáticamente en las bases de datos de las compañías. En la actualidad, las empresas innovadoras tratan todos estos datos como una valiosa fuente de información que debe examinarse cuidadosamente para intentar encontrar importantes (en ocasiones, fundamentales) relaciones que podrían llegar a transformar las prácticas empresariales habituales.

Los sistemas inteligentes, obtenidos mediante el empleo de técnicas derivadas de la Inteligencia Artificial, son capaces de realizar este tipo de tareas, proporcionando al agente encargado de tomar decisiones una valiosa ayuda cuando se trata de manejar grandes cantidades de información. Las características fundamentales de los llamados sistemas inteligentes, y que los hacen especialmente interesantes en su aplicación en el campo de la gestión empresarial, se pueden resumir en cinco: capacidad de aprendizaje, adaptabilidad, flexibilidad, capacidad de explicación y capacidad de descubrir (Goonatilake, 1995). Es necesario resaltar que no todas las técnicas inteligentes exhiben todas estas características. Cada técnica tiene sus puntos fuertes y debilidades y no pueden aplicarse de manera universal a todo tipo de problemas.

Probablemente la característica más importante de un sistema inteligente es su capacidad para aprender a realizar ciertas tareas o a tomar decisiones directamente, a partir de los datos de los que dispone. Es decir, son capaces de deducir un modelo de prácticas de gestión basándose en cientos o miles de decisiones pasadas. Habitualmente, este tipo de conocimiento está en poder de unos pocos individuos, con muchos años de experiencia en la realización de estas tareas o responsabilidades, lo que les confiere una importancia capital en el proceso de toma de decisiones. Por todo ello, la capacidad de aprender directamente de los datos disponibles y sin intervención humana se convierte en una posibilidad especialmente interesante y que, además, puede ayudar a superar las limitaciones de los profesionales humanos, como la posible existencia de conocimiento incompleto o inexacto.

Algunos sistemas inteligentes, como son las Redes Neuronales Artificiales (RNA), los Algoritmos Genéticos, el Razonamiento Basado en Casos, utilizan técnicas de aprendizaje automático para aprender a tomar decisiones basándose simplemente en datos del pasado. Estas técnicas contrastan con una generación anterior de sistemas inteligentes, constituida fundamentalmente por los Sistemas Expertos. En ellos, el conocimiento necesario para realizar ciertas tareas debe especificarse manualmente por un experto humano, lo cual constituye un proceso largo en el tiempo, caro y, en ocasiones, imposible. Esto se debe fundamentalmente a que los expertos encuentran grandes dificultades en articular

⁴ Este anexo ha sido realizado por Raul Pino y Paolo Priore.

‘conocimiento intuitivo’, o se muestran reacios a compartir su conocimiento o sus métodos y procedimientos.

El entorno en el que las empresas desarrollan su actividad está cambiando constantemente. Una práctica empresarial concreta puede quedar obsoleta rápidamente debido a una gran variedad de razones, como son: cambios macroeconómicos, decisiones de las empresas competidoras, regulaciones gubernamentales, etc. Los sistemas inteligentes deberían, por lo tanto, tener la capacidad de adaptarse a estos cambios. No es suficiente aprender el conocimiento inicial necesario para realizar una tarea o tomar una decisión, también deberá hacer un seguimiento continuo de su funcionamiento y revisar su conocimiento de acuerdo con los cambios detectados en el entorno en el que se desarrolla la actividad empresarial.

Cuando un humano toma una decisión, existe una flexibilidad inherente y se toma la decisión incluso cuando la información disponible es imprecisa e incompleta. Esta flexibilidad no aparece en los programas informáticos tradicionales, que trabajan con una lógica ‘sí/no’, ‘blanco o negro’, sin permitir la existencia de tonalidades o ‘grises’ intermedios. Por esta razón, estos programas no son robustos, fallan en cuanto una única condición no se ha especificado o no es correcta. En contraste, los sistemas inteligentes, como las Redes Neuronales Artificiales o los Sistemas Borrosos o Difusos (*fuzzy systems*), poseen la capacidad de tomar decisiones con una flexibilidad similar a la de los humanos. Pueden razonar con información incompleta y actuar correctamente en condiciones en las que no habían trabajado anteriormente.

Aunque los sistemas inteligentes tienen la capacidad de automatizar el proceso de toma de decisiones, existen razones organizativas y/o legales por las que las decisiones que se tomen deben explicarse de forma que sean entendidas por los humanos. No basta con llegar a una decisión final, sino que todo el proceso de razonamiento seguido hasta alcanzar el resultado debe ser transparente y entendible tanto por el personal como por el cliente (en su caso). En este sentido, mientras que algunos sistemas inteligentes, como los Sistemas Expertos, son capaces de proporcionar completas explicaciones de sus procesos de razonamiento, otras técnicas como las Redes Neuronales Artificiales tienen grandes dificultades para explicar sus decisiones.

La transparencia de los sistemas inteligentes es también importante para tener la posibilidad de mejorarlos. Hay claras evidencias que sugieren que, bajo ciertas condiciones, la revisión por parte de expertos humanos de los modelos de decisión de los sistemas inteligentes puede mejorar claramente la calidad de sus resultados. Por otro lado, si un sistema está ‘fallando’, sólo podrá ‘repararse’ si el proceso de razonamiento es entendible por los humanos que deben mejorarlos.

Los sistemas inteligentes pueden, no sólo automatizar tareas que actualmente ejecutan los humanos, sino que también ofrecen la posibilidad de descubrir o encontrar nuevos procesos o prácticas empresariales, que no eran conocidos previamente. El descubrimiento del conocimiento, o *data mining*, como se le conoce popularmente, puede definirse como la extracción no trivial de información implícita, previamente desconocida y potencialmente útil, a partir de los datos.

Existen varias técnicas inteligentes que son capaces de analizar grandes bases de datos y de

encontrar relaciones y patrones organizativos previamente desconocidos. Sin embargo, los resultados deben analizarse y verificarse para comprobar que son realmente relevantes y no meras casualidades estadísticas. Debido a estas razones, es importante que los resultados encontrados los verifique un experto humano antes de utilizarse en un contexto operativo.

Introducción a los Sistemas Inteligentes

En este apartado se hace una breve introducción a los sistemas inteligentes más conocidos: Redes Neuronales Artificiales, Algoritmos Genéticos, Sistemas de Decisión Borrosos, Sistemas Expertos y los Sistemas Híbridos, destacando para cada uno de ellos sus puntos fuertes y débiles y algunas aplicaciones.

Las Redes Neuronales Artificiales son dispositivos electrónicos, cuyo funcionamiento se inspira en el de las células (neuronas) que componen el sistema nervioso del cerebro humano. Las Redes Neuronales Artificiales están compuestas por muchas unidades simples (denominadas neuronas o nodos), muy interconectadas entre sí. Cada neurona realiza una serie de operaciones sencillas y envía el resultado de su trabajo a las neuronas con las que está conectada (Beale y Jackson, 1990). En contraste con los programas de ordenador convencionales, en los que se deben proporcionar paso a paso las instrucciones necesarias para resolver un problema concreto, las Redes Neuronales Artificiales pueden aprender a resolver los problemas o a realizar ciertas tareas, a través de un proceso de aprendizaje en el que se utilizan ejemplos ya resueltos del problema que se quiere resolver.

Las Redes Neuronales Artificiales proporcionan una metodología relativamente sencilla de modelado y previsión de sistemas no lineales, lo cual supone una interesante ventaja frente a los métodos estadísticos tradicionales, que son fundamentalmente lineales. Son también muy efectivas en el tratamiento de información incompleta o con un alto componente de ‘ruido’. La capacidad de manejar datos imprecisos junto con la posibilidad de aprender las hacen muy efectivas cuando se trata de procesar información de tipo financiero o de gestión en general. La principal limitación es que carecen de cualquier posibilidad de explicación de sus modos de razonamiento, es decir, no son capaces de proporcionar al usuario información sobre cómo han manejado los datos disponibles para llegar a un resultado concreto.

Debido a sus características, las Redes Neuronales Artificiales han sido y son cada vez más utilizadas en cualquier contexto dentro de la gestión de la empresa. Por ejemplo, en la literatura especializada se pueden encontrar multitud de trabajos en los que se describen aplicaciones en el campo de la visión artificial: reconocimiento de caracteres, compresión de imágenes, inspección de la calidad de un proceso de pintura, etc. Del mismo modo, numerosas publicaciones demuestran que las Redes Neuronales Artificiales pueden ofrecer buenas soluciones a problemas de optimización combinatoria como el conocido problema del ‘viajante de comercio’.

Existe gran cantidad de literatura sobre aplicaciones de las Redes Neuronales Artificiales dentro del área de la economía, administración y gestión de empresas: Zhang *et al.* (1998) hacen una revisión de aplicaciones de las Redes Neuronales Artificiales en esta área. Se han aplicado las Redes Neuronales Artificiales para hacer análisis de riesgos financieros y pronosticar bancarrotas, tipo de cambio de divisas, evolución cotización de acciones, rentabilidad e índices bursátiles, valoración de activos y previsión macroeconómica,

destacando la dificultad del tratamiento de estas series temporales debido a los efectos de la no linealidad, no estacionalidad, los altos niveles de ruido que suelen acompañarlas e incluso el tamaño (habitualmente son series bastante cortas). En trabajos similares se revisan aplicaciones de Redes Neuronales Artificiales en marketing. Se destacan las ventajas e inconvenientes de la aplicación a problemas típicos de marketing, como la segmentación de mercados o la identificación y caracterización de los consumidores.

Los Algoritmos Genéticos inspirados en los mecanismos de la evolución biológica constituyen una herramienta muy eficiente para resolver complejos problemas de optimización. La idea principal de un Algoritmo Genético es comenzar con una población de posibles soluciones de un problema, y después intentar producir nuevas generaciones de soluciones que sean mejores que las anteriores, a través de un proceso cíclico, que se compone de dos etapas: la reproducción para obtener nuevas soluciones a partir de las ya existentes y la evaluación de éstas con objeto de retener las que mejoran las soluciones iniciales, desechando las restantes (Davis, 1991). Se trata de una analogía directa al principio de ‘supervivencia de los mejores individuos’, enunciado por Darwin en sus estudios sobre la evolución de las especies.

Debido a su inherente estructuración paralela, los Algoritmos Genéticos han probado ser muy eficientes cuando se trata de manejar grandes cantidades de información. Se han mostrado muy efectivos en la resolución de complejos problemas de optimización combinatoria, como puede ser la secuenciación de tareas tipo producción en lote, o la confección de horarios y calendarios de trabajo. Además, son capaces de aprender complejas relaciones en conjuntos de datos incompletos y pueden utilizarse como herramientas de *data mining* para descubrir patrones previamente desconocidos. Pueden adaptarse a los cambios que se puedan producir en el entorno operativo en el que están incluidos y son capaces de proporcionar explicaciones sobre los resultados que han alcanzado en un formato que los humanos son capaces de entender (Davis, 1991).

Una limitación de los Algoritmos Genéticos, es que la asignación de los parámetros que controlan todo el proceso es difícil (depende, en gran medida, del problema que se pretende resolver) y se puede convertir en un proceso de prueba y error relativamente largo. Por otro lado, el correcto funcionamiento de un Algoritmo Genético depende, básicamente, del esquema de representación del problema. La selección de la representación más adecuada para un problema concreto puede requerir una extensa experimentación.

Aparte de las aplicaciones ya comentadas, los Algoritmos Genéticos se están utilizando cada vez más para ayudar en la resolución de problemas relacionados con las finanzas: pronosticar bancarrotas a partir de ratios financieros obtenidos del balance de la compañía, evaluación de créditos, análisis de inversiones, simulación y análisis de modelos econométricos, aplicaciones en el mercado de valores, etc.

La Lógica Borrosa o *fuzzy* tiene la particularidad de ser capaz de manejar conceptos ‘lingüísticos’ imprecisos, como, por ejemplo: pequeño, grande, joven, viejo, alto o bajo (Cox, 1994). Los sistemas de decisión basados en la Lógica Borrosa presentan una gran flexibilidad y se han mostrado muy útiles en sistemas de control industrial y en tareas de reconocimiento de patrones que van desde el reconocimiento de caracteres manuscritos hasta la evaluación de créditos. Actualmente existe una gran variedad de productos de consumo (lavadoras,

lavavajillas, hornos microondas, cámaras de fotografía y de vídeo, etc.), que utilizan la Lógica Borrosa en sus mecanismos de control.

La mayoría de los conceptos de la Lógica Borrosa puede englobarse en una metodología para operar más con términos lingüísticos que con expresiones numéricas, de donde surgirá la noción de ‘variable lingüística’ o variable borrosa. Aunque las palabras son inherentemente menos precisas que los números, su uso es más próximo a la intuición humana y, pese a que operar con palabras da mayor cabida a la imprecisión, generalmente disminuye los costes de las soluciones propuestas.

Si definimos una regla de inferencia borrosa como aquélla que especifica las relaciones entre variables borrosas, podremos hablar de razonamiento borroso como el proceso de obtención de conclusiones a partir de un conjunto de reglas borrosas. En contraste con los sistemas convencionales basados en reglas, en los que para que se active una regla se deben cumplir todos sus antecedentes, en la inferencia borrosa todas las reglas cuyas condiciones se cumplen total o parcialmente contribuyen al resultado final. Esta característica es la clave que está detrás de la capacidad de los sistemas borrosos para mostrar una gran flexibilidad cuando tratan informaciones incompletas y/o datos inconsistentes.

La limitación fundamental de los sistemas borrosos reside en que las funciones de pertenencia que definen las variables borrosas y las reglas de decisión borrosas deben especificarse manualmente, lo que implica la necesidad de seguir un proceso de prueba y error, que puede ser bastante largo y costoso. Por otro lado, no son capaces de adaptarse automáticamente a cambios en su entorno operativo. Esto sólo se puede llevar a cabo mediante la modificación o la adición de nuevas reglas de decisión.

Como ya se ha comentado, las aplicaciones de la Lógica Borrosa son muy amplias y variadas: desde sistemas de control a sistemas de ayuda en la gestión de proyectos. En cuanto a las aplicaciones de tipo financiero, se pueden destacar algunas: análisis de compra-venta de activos financieros, asesoramiento en procesos de inversión, intercambio de divisas, o detección de fraudes en el sistema de salud.

LECTURA 8: UN SISTEMA DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL ELIMINA EL ERROR HUMANO EN LOS HORNOS DE ACERALIA

Aceralia ha implantado en su factoría de Veriña (Gijón-Asturias) un sistema para controlar las coladas de los Hornos Altos a través de inteligencia artificial. Investigadores del departamento de Informática de la Universidad de Oviedo, con sede en el campus gijonés, han realizado el proyecto, que estará plenamente desarrollado a mediados del año 2001.

Este desarrollo tecnológico permitirá controlar el suministro de combustible a los hornos, así como el aporte de las materias primas para hacer el arrabio de la manera más eficiente. También alertará de cuándo hay peligro de que algún horno pueda sufrir algún daño durante la producción.

En concreto, el trabajo de los investigadores consiste en un ‘sistema experto en tiempo real’: en un programa informático se definen las reglas de comportamiento que debe seguir el horno, algunas de las cuales se deducen a partir de la experiencia de los propios trabajadores. Y es que la inteligencia artificial viene a complementar la función de los operarios, no a sustituirla. El sistema complementa la función de los operarios y les ayuda en las tareas más rutinarias, pero, al final, las decisiones siempre las toman los humanos.

Fuente: Fernández-Miranda, M. y Castro, M. (2000): “Un sistema de inteligencia artificial elimina el error humano en los hornos de Aceralia”, *La Nueva España*, 9 de diciembre.

Los Sistemas Expertos representan los primeros y más conocidos ejemplos de los que denominamos sistemas inteligentes. Como su nombre sugiere, intentan recoger en un programa informático el ‘conocimiento’ de un experto humano en un determinado campo de aplicación. El proceso de adquisición del conocimiento del experto se realiza, generalmente, a través de entrevistas y de una cuidadosa observación del experto cuando éste está realizando las tareas. Una vez adquirido, el conocimiento se representa en un formato que puede manipularse mediante el ordenador. Habitualmente, se utilizan las reglas de decisión, los marcos de referencia o las redes semánticas (Waterman, 1985).

El conocimiento se almacena en lo que se denomina la base de conocimientos, que, junto con el motor de inferencias y la interfase con el usuario, constituyen los elementos principales del Sistema Experto. El motor de inferencias es el mecanismo que dirige el proceso de razonamiento del sistema: si las premisas de una regla se cumplen, el motor de inferencia activa esa regla y se ejecuta, lo cual provocará que las premisas de otras reglas ahora se cumplan y que, por lo tanto, también se puedan ejecutar. De esta manera, se va encadenando el proceso de razonamiento hasta llegar a un resultado final.

La gran ventaja de los Sistemas Expertos es que son capaces de hacer una representación explícita del conocimiento, por lo que es relativamente sencillo entenderlo. Por esta misma razón, los Sistemas Expertos pueden generar completas explicaciones sobre cómo han llegado a una conclusión particular. Por el contrario, la limitación más importante es que carecen de mecanismos de aprendizaje automático de las reglas que utilizan. De ahí que no sean capaces de adaptarse automáticamente a los cambios en el entorno en el que están trabajando.

En la dirección de operaciones, los Sistemas Expertos se han utilizado en la fase de diseño del producto, en la planificación y programación de tareas o en el control de calidad del producto. Muchas de las aplicaciones de más éxito se han implantado en sistemas de mantenimiento y de diagnóstico de averías. Por otro lado, las aplicaciones de los Sistemas

Expertos en finanzas son muy amplias y variadas: multitud de instituciones financieras los utilizan habitualmente en la evaluación de créditos personales, gestión de la cartera de valores, previsión de los mercados financieros, seguros, etc.

LECTURA 9: ETAPAS ESENCIALES DE LA AUTOMATIZACIÓN

Muchas empresas norteamericanas recorrieron ‘a la pata coja’ su camino hacia la fabricación integrada por ordenador. Muchas se dieron un traspie, pero esto no ha desalentado a algunas de ellas a volver a intentarlo. Dos nuevas tecnologías, la inteligencia artificial y la programación orientada al objeto (*object-oriented programming*), podrían elevar la competitividad norteamericana. Pero las narices japonesas están oliéndose algo también.

1. Simplificar y reorganizar la fábrica para optimizar la eficiencia, sin automatización, o al menos sin nueva automatización. Sólo así las etapas posteriores conducirán a los máximos beneficios.
2. Crear “islas de automatización” con robots, células de fabricación flexible, controles por ordenador y otros sistemas de fabricación avanzados.
3. Unir las islas de automatización entre sí y al diseño asistido por ordenador (CAD) a través de una base de datos compartida, bien jerárquica o bien orientada al objeto.
4. Utilizar inteligencia artificial y *software* orientado al objeto para integrar algunas operaciones con CAD y para automatizar etapas tan complejas como la programación de la producción y diagnóstico.
5. Extender la inteligencia artificial y las técnicas orientadas al objeto a todas las etapas de la toma de decisiones, desde la planificación del producto al servicio al cliente. Esto es la empresa integrada por ordenador.

Fuente: Port, O.; Séller, Z.; Miles, G. L. y Schulman, A. (1989): “Smart factories: America’s turn?”, *Business Week*, 8 de mayo, pp. 142-148.

Aunque los sistemas inteligentes comentados anteriormente están siendo aplicados con mucho éxito en multitud de contextos empresariales, existen ciertos problemas complejos que no pueden resolverse empleando aisladamente estas técnicas. Cada una de ellas tiene sus fortalezas y limitaciones, que las hacen apropiadas para unos problemas, pero no para otros. Como ya se ha dicho, las Redes Neuronales Artificiales son muy buenas para clasificación, pero no cuando se trata de explicar cómo alcanzan sus resultados. La lógica borrosa puede explicar perfectamente sus decisiones, pero no es capaz de adquirir automáticamente las reglas que va a emplear para llegar a esas decisiones. Estas limitaciones son las que han dirigido las investigaciones hacia la creación de Sistemas Híbridos Inteligentes, en los que dos o más técnicas se combinan para superar las limitaciones de cada método por separado (Goonatilake, 1995).

Por ejemplo, cuando se usa un sistema borroso para la evaluación de créditos, un experto en la materia puede especificar las reglas necesarias para que el sistema tome una decisión. Una Red Neuronal Artificial puede utilizar su capacidad de aprendizaje para aprender automáticamente esas reglas de decisión borrosas, con lo que se ha creado un sistema híbrido capaz de superar las limitaciones del sistema borroso. Otros ejemplos pueden ser sistemas híbridos compuestos por sistemas borrosos y algoritmos genéticos, redes neuronales con sistemas expertos o redes neuronales con algoritmos genéticos.

CUESTIONES TEÓRICO-PRÁCTICAS

1. ¿En qué consiste la flexibilidad en fabricación?
2. Identifique algunos de los beneficios intangibles derivados de la automatización.
3. Analice las diferentes técnicas de automatización de los sistemas productivos, identificando las características distintivas de cada una de ellas.
4. La adopción de la automatización no permite que la fábrica incremente la productividad de modo instantáneo ¿Por qué?
5. Los trabajadores desplazados por la automatización de la fábrica suelen tener dificultades para encontrar un nuevo empleo. ¿Es posible defender, sobre bases éticas, la decisión de automatizar?
6. Reflexione acerca de si las diferentes técnicas de automatización que usted conoce son técnicas alternativas o complementarias. ¿Existe una secuencia lógica en la aplicación de estas técnicas? En este sentido, ¿qué representa la CIM?
7. Analice las razones que llevan a una empresa a automatizar sus procesos productivos, identificando los principales logros o consecuencias del proceso de automatización.
8. Identifique las principales barreras a las que se enfrentan las empresas a la hora de poner en práctica la automatización de sus procesos productivos.
9. Valore los efectos que la automatización de los procesos productivos tiene sobre la eficiencia, la productividad y el personal. Reflexione acerca de las implicaciones que tiene el nivel previo de mecanización y el tipo de proceso de producción que se desea automatizar a la hora de valorar tales efectos.

RECURSOS EN INTERNET

- Instituto de Tecnologías de Fabricación Integradas (*Integrated Manufacturing Technologies Institute, IMTI*): http://www.nrc.ca/imti/home_e.html
- Base de Conocimiento de Tecnologías Emergentes (*Emerging Technologies Knowledge Base*): <http://emergingtech.ittoolbox.com/>
- Nuevas Tecnologías de CISCO: <http://www.cisco.com/global/AR/tec/index.shtml>
- Robots.net: Web de últimas noticias sobre la industria robótica: <http://robots.net/>
- Inteligencia Artificial: <http://www.fortunecity.com/skyscraper/chaos/279/>
- Instituto de Aplicaciones de la Ingeniería Artificial (*Artificial Intelligence Applications Institute*): <http://www.aiai.ed.ac.uk>
- Web de RoboticSpot, página sobre sistemas robotizados de última generación: <http://www.roboticspot.com>

PANASONIC

Muchas empresas están sustituyendo la producción en masa por el paradigma de personalización masiva (*mass customization*), consiguiendo, de este modo, importantes ventajas frente a sus competidores. No obstante, es posible mantener ambas estrategias simultáneamente y la empresa National Bicycle Industrial Company (NBIC) es un ejemplo de ello.

La National Bicycle Industrial Company (NBIC) es una subsidiaria del gigante de la electrónica Matsushita. La empresa vende bicicletas bajo tres marcas: Panasonic, National e Hikari. El grueso de su producción y ventas (alrededor del 90%) reside en las marcas National e Hikari.

NBIC empezó a fabricar bicicletas bajo la marca Panasonic en 1987. Tras la introducción de su sistema de pedidos personalizados (*Panasonic Ordering System*, POS) para el mercado japonés, la empresa empezó a reconocerse como un ejemplo clásico de personalización en masa, es decir, de fabricación de productos bajo pedido en tamaños de lote unitario. Este sistema coloca al cliente en el inicio del proceso, en lugar de situarlo al final del mismo, partiendo así del pedido individual y no de objetivos brutos de producción. De esta forma, los clientes consiguen productos únicos.

Una bicicleta Panasonic fabricada exactamente a la medida, peso y preferencia de color del cliente tiene un precio entre un 20 y un 30 por ciento superior al de una bicicleta fabricada en masa. El cliente doméstico puede tener su bicicleta en dos semanas tras hacer su pedido y en sólo tres semanas si se trata de un cliente de fuera de Japón.

Todo esto es posible gracias a un proceso denominado *Panasonic Individual Customer System* (PICS) –se trata de un sistema de personalización de pedidos, similar al POS, pero desarrollado para ventas en el extranjero– que, con la ayuda de ordenadores avanzados, robots y una pequeña factoría, ofrece modelos exclusivos en la fábrica de la National Bicycle Industrial Company en Kokubu, Japón.

Esta fábrica cuenta con 20 empleados y un sistema de diseño asistido por ordenador (CAD) y en ella es posible fabricar cualquiera de las más de 11 millones de variantes de 18 modelos de bicicletas de carreras, carretera y montaña en 199 colores distintos para prácticamente cualquier estatura.

El sistema PIC funciona de la siguiente forma: el cliente visita un local de Panasonic, donde se le toman las medidas a través de un dispositivo especial. El propietario del establecimiento envía las especificaciones de la bicicleta por fax a la sala de control central de la fábrica, donde un operario las carga en un miniordenador, que, automáticamente, crea un anteproyecto único y genera un código de barras. El desarrollo del anteproyecto mediante el sistema CAD supone aproximadamente tres minutos, mientras que, antes de la implantación de este sistema informatizado, el personal de diseño de la empresa invertía tres horas. El código de barras se pega después a las diferentes piezas que, finalmente, se convertirán en la bicicleta personal del cliente.

En varias fases del proceso, los trabajadores de línea acceden a las exigencias del cliente leyendo la etiqueta del código de barras con un escáner y esta información, mostrada en una terminal en cada estación de trabajo, pasa directamente a las máquinas controladas por ordenadores que forman parte de una red de área local. En cada fase de la producción, un ordenador que lee el código de barras sabe que cada parte pertenece a una bicicleta específica y le dice a un robot dónde soldar o a un pintor qué diseño seguir. El código de barras representa algo así como el ADN de la bicicleta.

A pesar de utilizar ordenadores y robots, el proceso no está excesivamente automatizado. La fábrica se asemeja a un pequeño taller tradicional con artesanos instalando a mano el cableado de las marchas y serigrafiando el nombre del cliente en su bicicleta.

El tiempo total de fabricación y montaje que se precisa para terminar una sola bicicleta es de 150 minutos y la fábrica puede hacer unas 60 al día. Resulta interesante destacar que el cliente tarda dos o tres semanas en recibir una bicicleta personalizada que se fabrica en menos de tres horas. Según el director de ventas, “podríamos haber reducido más el tiempo, pero queremos que la gente se sienta excitada ante la expectación de recibir algo especial”.

Para darle un toque más personal a la personalización en masa, la fábrica tiene la responsabilidad de contactar directamente con el cliente nada más recibir el pedido. Se le envía por correo un dibujo personalizado de la bicicleta, con una nota dándole las gracias por elegir la bicicleta. A ésta le sigue

una segunda nota personal, tres meses más tarde, preguntando al cliente acerca de su nivel de satisfacción con la bicicleta y, finalmente, se le envía una “tarjeta de cumpleaños de la bicicleta” para conmemorar el primer aniversario del vehículo.

La NBIC está ahora estudiando la posibilidad de extender el sistema Panasonic a toda su producción de bicicletas, en tanto que Matsushita está considerando aplicar el concepto a la maquinaria industrial.

Mientras, la NBIC mantiene la producción en masa de bicicletas en otra fábrica e invierte 90 minutos en la fabricación de un modelo estándar.

Fuente: Moffat, S. (1990): “Japan’s new personalized production”, *Fortune International*, octubre 22, pp. 90-93; Kotha, S. (1995): “Mass customisation: Implementing the emerging paradigm for competitive advantage”, *Strategic Management Journal*, vol. 16, pp. 21-42; Davis, M. M.; Aquilano, N. J. y Chase, R. B. (1999): *Fundamentals of Operations Management*, McGraw-Hill, Londres.

CUESTIONARIO

1. Identifique las técnicas de automatización que ha utilizado Panasonic en el diseño y fabricación de las bicicletas de personalización masiva.
2. Analice las ventajas que la aplicación de estas nuevas tecnologías de la información ha aportado a esta empresa. En este sentido, reflexione especialmente acerca de la relevancia de las nuevas tecnologías en la aplicación de la estrategia de personalización masiva de Panasonic.

BOEING

Boeing consideró que había llegado el momento de desarrollar un nuevo mega-avión, un avión verdaderamente grande, en el momento en que la Cuenca del Pacífico –región cuyos clientes representaban alrededor del 75 por ciento de los pedidos de aviones grandes de Boeing– comenzó a experimentar un rápido crecimiento.

Por otro lado, la amenaza de Airbus Industries, que consiguió un pedido importante de United Airlines a principios de los años 90 –50 aviones A320 con opción de compra de otros 50, que reemplazarían a los Boeing 727 casi obsoletos de United–, fue otra de las razones por las que Boeing decidió la fabricación de un nuevo aparato diseñado radicalmente para el siglo XXI.

Así, el resultado fue el *jet* Boeing 777, un aparato de dos reactores, de fuselaje ancho y de autonomía de vuelo entre mediana y grande. Este avión supondría un incremento de peso del 57 por ciento en comparación con su antecesor, el 767. Con más de 3 millones de piezas independientes, el coste global del desarrollo y la producción del 777 fue del orden de 10 a 12 mil millones de dólares. Se trata del mayor avión de dos motores jamás construido. Hasta octubre de 2005 la compañía ha vendido 718 unidades de este modelo de avión, de las cuales ha entregado 531.

Por otro lado, a principio de los años noventa Boeing diseñaba los mejores aviones de la industria, pero no tenía esta misma fortaleza en su fabricación, incurriendo en elevados costes. Con una inversión financiera de este calibre, tanto Boeing como sus clientes querían asegurarse de que el avión volaría, sin necesidad de introducir modificaciones, desde el momento de su salida de la línea de montaje.

Con este fin, Boeing depositó su confianza en el diseño asistido por ordenador (CAD). El 777 sería el primer avión de la empresa diseñado completamente por ordenador y por ello ha recibido el nombre de primer *jet* ‘sin papeleo’. Boeing diseñó el avión con ocho ordenadores IBM 3090, que soportaban 2.200 estaciones de trabajo, los cuales terminaron por manejar 3,5 millardos de información. El diseño por ordenador permitió diseñar todo el 777, desde la cabina principal hasta los instrumentos que se usarían para el mantenimiento de la nave. Más de 1700 ingenieros trabajaron juntos en el proyecto para fabricar las piezas y las herramientas del avión, que funcionaría perfectamente desde el principio. Este sistema de diseño redujo la posibilidad de errores humanos y recortó los cambios de ingeniería y de componentes mal ajustados en más del 50 por ciento respecto a los proyectos de aviones anteriores. De esta manera, Boeing pretendía ahorrar las enormes cantidades que gastaba habitualmente en resolver problemas durante el proceso de fabricación y tras la entrega de los aviones a las compañías aéreas.

Para conseguirlo, el CAD funciona del siguiente modo. En primer lugar, un ordenador genera el diseño de uno de los componentes previstos para el avión. A continuación un ‘humano virtual’ prueba el componente. En el caso de Boeing, este sujeto virtual se seleccionó de una de 12 series de población, cada una de las cuales contiene a miles de personas medidas con base en más de 35 dimensiones. Estas medidas se pueden utilizar para generar una gran variedad de estilos corporales humanos que, después, se usan para analizar la ergonomía del avión. Por ejemplo, los diseñadores del 777 descubrieron, por medio de esta técnica CAD, que un mecánico tendría problemas para llegar a un ventilador sobre la cabina principal. Parado sobre una escalera y estirándose por la puerta de acceso, el mecánico perdería el equilibrio y podría caer. Con el sistema CAD los diseñadores pudieron reconfigurar la puerta de acceso para eliminar el problema. El diseño, la construcción y la modificación de la puerta de acceso se realizaron íntegramente en el ordenador.

El CAD también permite que los diseñadores de herramientas reciban información tridimensional constantemente actualizada, proporcionada por los ingenieros. Con el CAD la pieza del avión para el cual se construirá la herramienta se representa de forma tridimensional en la ubicación real que ocupará en el avión. El diseñador puede, a continuación, crear una herramienta que se usará específicamente en esa pieza. Incluso puede comparar el tamaño de la pieza con el espacio de almacenamiento que se le asigna.

Los programas del CAD se pueden hacer a la medida para ofrecer simulaciones de casi cualquier

aspecto del diseño, la producción o el uso. Así, Boeing empleó el CAD de tal forma que los humanos generados por ordenador actuaron como pilotos, ayudantes de vuelo y pasajeros. De esta forma se facilitó el diseño de los controles, los asientos y las áreas de descanso de la cabina o los asientos de los inodoros.

El CAD también fue útil para mejorar la construcción real del 777. Los trabajadores de la línea de montaje recibieron instrucciones de trabajo, que incluían gráficos detallados e instrucciones explícitas acerca de cómo ensamblar el avión. Los gráficos generados por los ordenadores tienen la ventaja adicional de que se pueden alterar con facilidad, en caso de que se deban hacer cambios en el diseño.

En general, el CAD ha redefinido la forma de construir un avión. Antes, los ingenieros continuaban con el diseño del avión, incluso cuando ya se había iniciado la construcción del mismo. Con frecuencia, se realizaban cambios en el diseño a medida que surgían problemas durante la construcción, o incluso cuando los aviones ya estaban contruidos. El sistema CAD empleado para desarrollar el 777 permitía detectar los posibles fallos o problemas antes de que se iniciase la construcción del avión. Esta reducción de la necesidad de modificaciones y reparaciones condujo, por tanto, a una reducción notable de los costes de producción del 777. En definitiva, por medio de la tecnología del CAD, Boeing ha desarrollado el 777 en menos tiempo y dinero, además de lograr su fabricación con mayor calidad y seguridad.

Además, se introdujeron mejoras en el almacenaje de herramientas y en el mantenimiento más sencillo, que contribuyeron a una mayor satisfacción de los clientes.

Por su parte, los empleados de Boeing consideran que el proceso de diseño y fabricación del 777 redundó en ajustes menos numerosos y más precisos en su gigantesca fábrica situada en Everett (Washington), al Norte de Seattle. De hecho, los analistas y directivos de la industria aeronáutica afirman que el 777 permitió, que, por primera vez, los clientes y los empleados de Boeing en todos los niveles participasen plenamente en el proceso de diseño.

Fuente: Adaptado de Stoner, J. A. F.; Freeman, R. E. y Gilbert, D. R. (1995): *Management* (6ª edición), Prentice-Hall, Nueva York; Ivancevich, J. M.; Lorenzi, P.; Skinner, S. J. y Crosby, P. B. (1994): *Management Quality and Competitiveness*, Irwin, Homewood; <http://www.boeing.com>

CUESTIONARIO

1. Analice en profundidad los cambios experimentados en Boeing en los procesos de diseño y fabricación del 777 como consecuencia de la utilización del CAD.
2. ¿Qué consecuencias ha tenido sobre los criterios de éxito competitivo de Boeing la introducción del CAD?

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMICRO (1986): *Hacia la Automatización del Diseño y la Fabricación*, Instituto de la Pequeña y Mediana Empresa (IMPI), Madrid.
- ADLER, P. (1988): "Managing flexible automation", *California Management Review*, primavera, pp. 34-56.
- AYRES, R. U. y BUTCHER, D. C. (1993): "The flexible factory revisited", *American Scientist*, septiembre-octubre, pp. 448-459.
- BEACH, R.; MUHLEMANN, P. y PRICE, D. H. R. (2000): "Manufacturing operations and strategic flexibility: Survey and cases", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 20, nº 1, pp. 7-30.
- BEALE, R. y JACKSON, T. (1990): *Neural Computing – An Introduction*, Adam Hilger, Bristol.
- BEATTY, C. A. y GORDON, J. R. M. (1988): "Barriers to the implementation of CAD/CAM systems", *Sloan Management Review*, primavera, pp. 25-33.
- BESSANT, J. (1991): *Managing Advanced Manufacturing Technology*, Blackwell, Londres.
- BRADT, L. J. y ALLRED, J. K. (1983): "Materials-handling systems", *IEEE Spectrum*, vol. 20, nº 5, pp. 74-77.
- BRAVERMAN, H. (1974): *Labour and Monopoly Capital: The Degradation of Work in the Twentieth Century*, Monthly Review Press, Londres.
- BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S. y STECKE, K. (1984): "Classification of flexible manufacturing systems", *The FMS Magazine*, abril, pp. 114-118.
- CILLARIO, L. (1991): "El engaño de la flexibilidad. Elementos para una crítica de la ideología de la automatización flexible", en CASTILLO, J. J. (Ed.): *La Automatización y el Futuro del Trabajo*, Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Madrid.
- COX, E. (1994): *The Handbook of Fuzzy Systems*, Academic Press, Nueva York.
- DAFT, R. L. (1998): *Organizational Theory and Design*, South Western College Publishing, Cincinnati.
- DANIELLOU, F.; DURAFFOURG, J. y GUERIN, F. (1982): "Automatiser: Quelle place pour le travail humain", *Le Nouvel Automatisme*, septiembre, pp. 47-53.
- DAVIS, L. (1991): *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J. y CHASE, R. B. (1999): *Fundamentals of Operations Management*, McGraw-Hill, Londres.
- DEAN, J. W.; YOON, S. J. y SUSMAN, G. I. (1992): "Advanced manufacturing technology and organizational structure: Empowerment or subordination", *Organization Science*, vol. 3, pp. 203-229.
- DEVOL, G. C. (1987): "La nueva revolución industrial: las aplicaciones y los usos de los robots industriales", en ASIMOV, I. y FRENKELI, K. A. (Eds.): *Robots*, Plaza y Janés, Barcelona.

- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. (Coord.) (1995a): *Dirección de Operaciones. Aspectos Tácticos y Operativos en la Producción y los Servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. (Coord.) (1995b): *Dirección de Operaciones. Aspectos Estratégicos en la Producción y en los Servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- ENGELBERGER, J. (1985): *Robotics in Practice*, Kogan Page Ltd., Londres.
- FERNÁNDEZ, E. (1993): *Dirección de la Producción I. Fundamentos Estratégicos*, Civitas, Madrid.
- FIX-STERZ, J. y LAY, G. (1987): “El papel de los sistemas flexibles de fabricación en el marco de los nuevos avances en ingeniería de producción”, *Sociología del Trabajo*, otoño, pp. 33-64.
- FLECK, J. (1983): “The adoption of robots”, *13th International Symposium on Industrial Robots*, Chicago, abril.
- FOULKES, F. K. y HIRSCH, J. L. (1984): “People make robots work”, *Harvard Business Review*, enero-febrero, pp. 94-102.
- GERWIN, D. (1993): “Manufacturing flexibility: A strategic perspective”, *Management Science*, vol. 39, nº 4, pp. 395-410.
- GOLD, B. (1982): “CAM sets new rules for production”, *Harvard Business Review*, noviembre-diciembre, pp. 88-94.
- GOLDHAR, J. y JELINEK, M. (1983): “Plans for economies of scope”, *Harvard Business Review*, noviembre-diciembre, pp. 141-148.
- GOLDHAR, J. D. y LEI, D. (1995): “Variety is free: Manufacturing in the twenty-first century”, *Academy of Management Executive*, vol. 9, nº 4, pp. 73-86.
- GOODMAN, L. L. (1957): *Man and Automation*, Harmonds/Worth, Penguin, Londres.
- GOONATILAKE, S. (1995): “Intelligent systems for finance and business: An overview”, en GOONATILAKE, S. y TRELEAVEN, T. (Eds.): *Intelligent Systems for Finance and Business*, John Wiley, Nueva York.
- GROOVER, M. P. y WIGINTON, J. C. (1986): “CIM and the flexible automated factory of the future”, *Industrial Engineering*, enero, pp. 75-85.
- GUNN, T. G. (1987): *Manufacturing for Competitive Advantage: Becoming a World-Class Manufacturer*, Ballinger Publishing, Cambridge.
- HAM, I. (1991): “Tecnología de grupo”, en SALVENDY, G. (Ed.): *Manual de ingeniería industrial. Vol. I*, Noriega-Limusa, México.
- HARRINGTON, J. (1973): *Computer Integrated Manufacturing*, Academic Press, Nueva York.
- HAWKES, B. R. (1989): *The CAD/CAM Process*, Pitman Publishing, Londres.
- HIRSCHHORN, C. (1984): *Beyond Mechanization: Work and Technology in a Postindustrial Age*, The MIT Press, Cambridge.
- HUGE, E. C. y ANDERSON, A. D. (1988): *The Spirit of Manufacturing Excellence*, Dow-Jones-Irwin, Homewood.
- HYER, N. L. y WEMMERLÖV, U. (1984): “Group technology and productivity”, *Harvard Business Review*, vol. 62, nº 4, julio-agosto, pp. 140-149.

- JAIKUMAR, R. (1986): "Postindustrial manufacturing", *Harvard Business Review*, noviembre-diciembre, pp. 69-76.
- KATZAN, H. (1984): *A Manager's Guide to Productivity, Quality Circles, and Industrial Robots*, Van Nostrand Reinhold Company, Nueva York.
- KOHLER, C. y SCHULTZ-WILD, R. (1985): "Flexible manufacturing systems manpower problems and policies", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 4, n° 2, pp. 135-146.
- LEONARD-BARTON, D. y KRAUS, W. A. (1985): "Implementing new technology", *Harvard Business Review*, vol. 85, n° 6, noviembre-diciembre, pp. 102-110.
- MALLET, S. (1975): *The New Working Class*, Spokesman, Nottingham.
- MANSFIELD, E. (1984): "Changes in information technology, organization design and management control", en PIERCY, N. (Ed.): *The Management Implication of New Information Technology*, Croom Helm, Londres.
- MEREDITH, J. (1987): "The strategic advantages of new manufacturing technologies for small firms", *Strategic Management Journal*, vol. 8, pp. 249-258.
- MERCHANT, E. (1980): "The factory of the future-Technological aspects", en KOPS, L. (Ed.): *Toward the Factory of the Future*, The American Society of Mechanical Engineers, Nueva York.
- MOCHÓN, J.; APARICIO, R.; ARMADA, M. y GAGO, A. (1986): "Introducción a los sistemas para CAD/CAM/CIM/CAE/CAL/CAI: Estado actual y perspectivas", en MONPIN, J. P. (Ed.): *Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y Fabricación por Computador*, Marcombo, Barcelona.
- NARASIMHAN, S.; MCLEAVEY, D. W. y BILLINGTON, P. (1995): *Production Planning and Inventory Control (2º edición)*, Prentice-Hall, Nueva York.
- NEMETZ, P. y FRY, L. W. (1988): "Flexible manufacturing organizations: Implications for strategy formulation and organization design", *Academy of Management Review*, vol. 13, n° 4, pp. 627-638.
- NO, J. (1987): "La robótica industrial", *Electrónica*, n° 395, octubre, pp. 94-98.
- NOORI, H. y RADFORD, R. (1995): *Production and Operations Management*, McGraw-Hill, Nueva York.
- OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO (OIT) (1987): *Automatización, Organización y Tensión en el Trabajo*, Ministerio de Trabajo y de la Seguridad Social, Madrid.
- OLHAGER, J. (1993): "Manufacturing flexibility and profitability", *International Journal of Production Economics*, vol. 30/31, pp. 67-78.
- PUENTE, E. A. (1983): "La automatización flexible", *Mundo Electrónico*, n° 130, pp. 81-89.
- READER, D. E. (1982): "Human factors in automation", *Manufacturing Engineering*, octubre, pp. 43-45.
- REMBOLD, U.; NNAJI, B. O. y STORR, A. (1993): *Computer Integrated Manufacturing and Engineering*, Addison-Wesley, Reading.
- ROSENTHAL, S. R. (1984): "Progress toward the factory of the future", *Journal of Operations*

- Management*, vol. 4, pp. 203-229.
- SCHMITT, N. M. y FARWELL, R. F. (1983): *Understanding Automation Systems*, Howard W. Sams, Londres.
- SEKIGUCHI, Y. (1989): “Automatización de fábricas en Japón”, en MONDEN, Y.; SHIBAKAWA, R.; TAKAYANAGI, S. y NAGAO, T. (Eds.): *El Estilo Japonés de Dirección de Empresas*, Tecnología de Gerencia y Producción, Madrid.
- SETHI, A. K. y SETHI, S. P. (1990): “Flexibility manufacturing: A survey “, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 2, nº 4, pp. 289-328.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A. y JOHNSTON, R. (1998): *Operations Management (2º edición)*, Pearson Education Ltd., Londres.
- TARONDEAU, J. C. (1987): “Technologies flexibles: L’impact sur les performances”, *Revue Francaise de Gestion*, nº 63, pp. 31-41.
- THOMPSON, H. y PARIS, M. (1982): “The changing face of manufacturing technology”, *Journal of Business Strategy*, vol. 3, nº 1, pp. 49-52.
- UPTON, D. (1994): “The management of manufacturing flexibility”, *California Management Review*, vol. 36, nº 2, pp. 72-89.
- WARNER, M. (1984): “New technology, work organizations and industrial relations”, *Omega. International Journal of Management Science*, vol. 12, nº 3, pp. 203-210.
- WATERMAN, D. A. (1985): *A Guide to Expert Systems*, Addison-Wesley, Reading.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. y ROOS, D. (1990): *The Machine that changed the World*, Rawson Associates, Nueva York.
- ZHANG, G.; PATUWO, B. E. y HU, M. Y. (1998): “Forecasting with artificial neural networks: The state of the art”, *International Journal of Forecasting*, vol. 14, pp. 35-62.