

# Índice

Prólogo .....	13
Presentación .....	15
1. INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN CON CONTROL NUMÉRICO ...	17
1.1. Introducción .....	19
1.2. Evolución de la automatización de los procesos de fabricación .	19
1.3. Modelos productivos .....	21
1.3.1. Modelo artesanal .....	21
1.3.2. Primer modelo industrial .....	22
1.3.3. Segundo modelo industrial .....	22
1.3.4. Modelo actual .....	23
1.4. Desarrollo del control numérico .....	24
1.5. Fabricación flexible .....	28
1.5.1. Sistemas de manipulación y transporte .....	30
1.5.2. Máquinas-herramienta con control numérico .....	30
1.6. Control de la fabricación por ordenador .....	32
1.7. Recapitulación .....	33
2. DISPOSITIVOS DE CONTROL .....	35
2.1. Introducción .....	37
2.2. Actuadores .....	38
2.2.1. Motores de corriente continua .....	38
2.2.2. Motores asíncronos o de inducción .....	41
2.2.3. Motores paso a paso .....	45

2.2.4.	Motores síncronos de imanes permanentes .....	46
2.2.5.	Accionamientos neumáticos .....	48
2.2.6.	Accionamientos hidráulicos .....	49
2.3.	Medida de la posición y velocidad .....	50
2.4.	Sensores de movimiento digitales .....	51
2.4.1.	Detectores incrementales .....	52
2.4.2.	Detectores absolutos .....	54
2.5.	Detectores analógicos .....	55
2.6.	Conclusiones .....	57
3.	ASPECTOS PREVIOS DE LA PROGRAMACIÓN DE MÁQUINAS-HERRA- MIENTA CON CONTROL NUMÉRICO .....	59
3.1.	Introducción .....	61
3.2.	Comunicación de órdenes a la máquina .....	62
3.3.	Fases de la programación .....	63
3.4.	Estructura de un programa pieza .....	63
3.5.	Identificación de funciones .....	64
3.6.	Sistemas de ejes en las MHCN .....	65
3.7.	Orígenes en las MHCN .....	68
3.7.1.	Punto cero de la máquina (M) .....	68
3.7.2.	Origen pieza (W) .....	68
3.8.	Puntos de referencia .....	70
3.8.1.	Punto de referencia de orígenes (R) .....	70
3.8.2.	Punto de referencia de la herramienta (N) .....	71
3.9.	Funciones modales .....	71
3.10.	Programación del avance (F) .....	71
3.11.	Programación de la velocidad de giro del cabezal (S) .....	73
3.12.	Funciones auxiliares (M) .....	74
3.13.	Programación de cotas .....	76
3.13.1.	Coordenadas cartesianas .....	76
3.13.2.	Coordenadas polares .....	76
3.13.3.	Coordenadas cilíndricas .....	81
3.13.4.	Programación de coordenadas empleando dos ángulos ..	81
3.13.5.	Programación de coordenadas empleando un ángulo y una coordenada cartesiana .....	83
4.	FUNCIONES PREPARATORIAS .....	85
4.1.	Introducción .....	87
4.2.	Funciones de movimiento lineal y circular .....	88
4.2.1.	Posicionamiento rápido (G00) .....	88
4.2.2.	Interpolación lineal (G01) .....	89
4.2.3.	Interpolación circular (G02/G03) .....	90

4.2.3.1.	Interpolación circular con programación del centro de arco en coordenadas absolutas (G06) ....	91
4.2.3.2.	Selección de los planos de interpolación en fresadora (617-619) .....	92
4.2.3.3.	Trayectoria circular tangente a la trayectoria anterior (G08) .....	95
4.2.3.4.	Trayectoria circular definida mediante tres puntos (G09).....	97
4.2.3.5.	Interpolación helicoidal .....	98
4.3.	Temporización (G04) .....	99
4.4.	Transición entre bloques: interpolación con arista matada (G05)	99
4.5.	Transición entre bloques: interpolación con arista viva (G07) .....	99
4.6.	Empleo de herramientas motorizadas en torno .....	100
4.6.1.	Mecanizado en la superficie cilíndrica (G15) .....	103
4.6.2.	Mecanizado en la superficie frontal (G16) .....	104
4.7.	Selección de orígenes (CNC 8025) .....	105
4.8.	Selección de unidades de medida (G70, G71) .....	106
4.9.	Programación en coordenadas absolutas (G90) o incrementales (G91) .....	106
4.10.	Programación de la herramienta (T) .....	107
4.11.	Compensación de herramienta .....	107
4.12.	Compensación del radio de herramienta .....	110
4.13.	Compensación de longitud en máquina-herramienta de tipo fresadora (G43 y G44) .....	115
4.14.	Compensación tridimensional de la herramienta .....	118
4.15.	Factor de escala (G72) .....	120
4.16.	Redondeo controlado de aristas (G36) .....	123
4.17.	Entrada tangencial al comienzo del mecanizado (G37) .....	124
4.18.	Salida tangencial (G38) .....	126
4.19.	Mecanizado de chaflanes (G39) .....	127
4.20.	Roscado electrónico (G33) .....	128
4.21.	Imagen espejo (G10÷G13) .....	132
4.22.	Recapitulación .....	133
5.	PROGRAMACIÓN DE CICLOS FIJOS DE MECANIZADO .....	135
5.1.	Introducción .....	137
5.2.	Ciclos fijos de torneado CNC (8025-TU) .....	138
5.3.	Ciclo fijo de seguimiento de perfil (G66) .....	138
5.4.	Ciclo fijo de desbastado en el eje X (G68) .....	141
5.5.	Ciclo fijo de desbastado en el eje Z (G69) .....	144
5.6.	Ciclo fijo de torneado de tramos rectos (G81) .....	146
5.7.	Ciclo fijo de refrentado de tramos rectos (G82) .....	148
5.8.	Ciclo fijo de taladrado (G83) .....	149
5.9.	Ciclo fijo de torneado de tramos curvos (G84)) .....	150
5.10.	Ciclo fijo de refrentado de tramos curvos (G85) .....	152

5.11.	Ciclo fijo de roscado longitudinal (G86) .....	153
5.12.	Ciclo fijo de roscado frontal (G87) .....	155
5.13.	Ciclo fijo de ranurado en el eje X (G88) .....	157
5.14.	Ciclo fijo de ranurado en el eje Z (G89) .....	158
5.15.	Ciclos fijos de mecanizado en fresadora .....	159
5.16.	Ciclos fijos de mecanizado para una fresadora con CNC (8025-MU) ..	159
5.17.	Ciclo fijo definido por el usuario (G79) .....	161
5.18.	Definición del ciclo .....	162
5.19.	Ciclo fijo de taladrado (G81) .....	163
5.20.	Ciclo fijo de taladrado con temporización (G82) .....	164
5.21.	Ciclo fijo de roscado con macho (G84) .....	165
5.22.	Ciclo fijo de escariado (G85) .....	167
5.23.	Ciclo fijo de mandrinado con retroceso en avance rápido G00 (G86) .....	168
5.24.	Ciclo fijo de mandrinado con retroceso en avance de trabajo G01 (G89) .....	169
5.25.	Ciclo fijo de taladrado profundo (G83) .....	169
5.26.	Ciclo fijo de cajera rectangular (G87) .....	172
5.27.	Ciclo fijo de cajera circular (G88) .....	174
6.	PROGRAMACIÓN AVANZADA CON CONTROL NUMÉRICO I .....	177
6.1.	Salto incondicionales (G25) .....	179
6.2.	Funciones para guardar y recuperar orígenes de coordenadas (G31 y G32, CNC 8025) .....	180
6.3.	Programación de subrutinas .....	181
6.3.1.	Subrutinas estándar .....	181
6.3.2.	Anidamiento de subrutinas .....	184
6.3.3.	Programación de subrutinas paramétricas .....	184
6.4.	Programación paramétrica .....	187
6.5.	Recapitulación .....	199
7.	PROGRAMACIÓN AVANZADA CON CONTROL NUMÉRICO II .....	201
7.1.	Introducción .....	203
7.2.	Programación de perfiles empleando el control S3045 de Selca (PROGET2) .....	204
7.2.1.	Programación de trayectorias circulares .....	204
7.2.2.	Programación de trayectorias rectilíneas .....	206
7.2.3.	Recta que pasa por dos puntos o tangente a dos circunfe- rencias .....	206
7.2.4.	Recta que pasa por un punto o tangente a una circunfe- rencia y que forma un ángulo con el eje X .....	208
7.2.5.	Programación de chaflanes .....	208
7.2.6.	Programación de acuerdos circulares entre trayectorias ..	209

---

7.2.7. Memorización de entes geométricos .....	210
7.2.8. Rototraslación del origen .....	211
7.2.9. Interpolación con <i>splines</i> .....	211
7.2.10. Ejemplos de programación .....	212
7.3. Programación libre de contornos FK .....	217
7.4. Sistemas asistidos por ordenador .....	225
7.4.1. Sistemas de CAD/CAM .....	225
7.4.2. Planificación de procesos asistida por ordenador (CAPP) .....	226
7.4.3. Integración de sistemas de CAD/CAPP/CAM .....	226
7.5. Recapitulación .....	227
ANEXO I: Programación del CNC 8050 de Fagor .....	229
ANEXO II: Programación del TNC 430 de Heidenhain .....	237
ANEXO III: Programación del CNC S3045P de Selca .....	255
ANEXO IV: Normativa referente a MHCN .....	275
ANEXO V: Ejemplos de programación y problemas propuestos .....	287
BIBLIOGRAFÍA .....	307

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En sentido amplio, se entiende por *fabricación* el «proceso de transformación de materias naturales o artificiales, mediante la intervención humana y de las máquinas, en instrumentos y productos aptos para satisfacer las necesidades de las personas».

Desde esta óptica, todo *proceso de fabricación* consta de una o varias *operaciones* elementales o fases, precisa de un *espacio físico* (de propósito general o específico) y consume un cierto *tiempo*. En general, el *espacio físico* suele corresponder a una máquina transformadora o *máquina-herramienta*, responsable de la ejecución del proceso.

Al respecto, puede establecerse que un *proceso de fabricación* «requiere una tecnología específica, discurre en un único tipo de máquinas, precisa de un determinado requerimiento energético y presenta unas características particulares que le hacen identificable frente a otros procesos, principalmente en lo referente a los fundamentos científico-técnicos en los que se basa y en el tipo de información tecnológica utilizada».

## 1.2. EVOLUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

Uno de los aspectos que incide de una forma más significativa en la realización y optimización de los procesos de fabricación es el relativo al trasvase de la *información* del proceso. Dicha información suele estar recogida en los cuatro elementos siguientes:

- Soporte de información.
- Máquina-herramienta.
- Herramienta y utillaje.
- Operario.

Inciendo sobre estos elementos, en gran medida, el nivel de *automatización* del proceso. Es decir, la secuencia de interrelación entre esos cuatro elementos se altera sustancialmente según el grado de automatización disponible en el *proceso de fabricación*.

En general, se entiende por *automatización* el «nivel de mecanización de las actividades humanas», siendo *mecanización* «la incorporación del empleo de las máquinas».

El término inglés de *automation* aplicado a la fabricación industrial es comúnmente atribuido a D.S. Harder, de la Ford Motor Company, que lo utilizó en 1946 para referirse al «sistema de fabricación en cadena», implantado en su empresa.

En la actualidad la *automatización* abarca varios niveles, que van desde la desactivación, sin intervención humana, de una operación de una máquina cuando se alcanza un tope «fin de carrera», hasta el empleo de robots inteligentes en tareas de alta complejidad en entornos cambiantes.

Los principales grados de la mecanización y automatización de las actividades físicas son los indicados a continuación, que se fundamentan en el empleo de los útiles y máquinas respectivos:

- a) *Manual*: cuando únicamente son empleadas las manos, pudiendo ser ayudadas por alguna otra parte del cuerpo humano (pies, hombro, etc.).
- b) *Herramienta manual*: cuando las manos humanas manipulan directamente una o varias herramientas, siendo responsables tanto de su accionamiento como de su sujeción y posicionamiento (p.e.: el empleo conjunto de mazo y escoplo).
- c) *Herramienta manual mecanizada (máquina-herramienta manual)*: cuando se manipula una herramienta motorizada, de manera que el accionamiento principal lo ejecuta la propia máquina, mientras que el posicionamiento y la sujeción son manuales (p.e.: taladradora manual de bricolaje).
- d) *Máquina-herramienta universal*: la máquina efectúa la sujeción, el posicionamiento y el accionamiento, quedando relegada la acción humana al manejo de dicha máquina y a la responsabilidad global de las operaciones (p.e.: torno paralelo).
- e) *Máquina de ciclo fijo*: la máquina realiza de una manera automática y desatendida una operación o un ciclo de operaciones concretas. Si se quisiera realizar otro ciclo ligeramente diferente, habría que desmontar la máquina y proceder a la sustitución de alguno de sus componentes (p.e.: torno automático de levas).
- f) *Máquina de ciclo programable*: en este caso, la máquina realiza automáticamente las operaciones programadas. La programación de otro ciclo de operaciones diferente puede realizarse sin necesidad de desmontar la máquina ni sustituir ninguno de sus componentes. Dicha programación suele realizarse a máquina parada y simultáneamente a ella deben ser sustituidas las herramientas y utillajes específicos de cada conjunto de operaciones.

- g) *Máquina inteligente*: este tipo de máquina va dotada de sensores para poder captar los estímulos de su entorno de trabajo y realiza las operaciones mediante la toma automática de decisiones para intentar alcanzar los objetivos que tiene programados. Adviértase que, a diferencia del grado anterior, este tipo de máquinas no tiene programada una secuencia concreta de operaciones, sino unos objetivos y unas pautas de comportamiento.

### 1.3. MODELOS PRODUCTIVOS

La implantación industrial de cada uno de los grados de mecanización y automatización, vistos en el apartado anterior, conlleva unas localizaciones productivas (medio doméstico, taller, fábrica, etc.) concretas, así como unas estructuras organizativas específicas. Al efecto van a ser distinguidos los siguientes *modelos productivos*, surgidos en sus respectivos períodos históricos:

- Modelo artesanal.
- Primer modelo industrial.
- Segundo modelo industrial.
- Modelo actual.

#### 1.3.1. Modelo artesanal

Este modelo fue el predominante durante el período de tiempo comprendido entre las civilizaciones clásicas y la Revolución Industrial. Presentaba importantes características diferenciadoras frente a la situación observada en épocas precedentes, o modelo primitivo.

Con el *modelo artesanal* aparecen las primeras aproximaciones al concepto actual de fabricación, basadas en «la adecuación de los productos elaborados por unos para la satisfacción de las necesidades de otros».

En este modelo la función productiva se realizaba en el medio doméstico o en talleres muy ligados a dicho medio. Los niveles de mecanización consolidados por este modelo se corresponden con los dos primeros de la relación anteriormente dada; esto es: manual y con herramientas manuales. Sin embargo, en algunos sectores y aplicaciones existían casos en los que el nivel tercero (máquinas-herramienta manuales) se encontraba en avanzado estado de desarrollo, mientras que el cuarto (máquinas-herramienta) era de empleo muy restringido.

El tipo de energía más generalizado era la muscular, si bien la hidráulica y la eólica tenían un alto grado de utilización en algunas tecnologías (p.e.: en la navegación) y en determinados sectores manufactureros (molinería, minas, etc.).

En lo referente a la organización del trabajo y a la gestión del proceso productivo se recurría a técnicas basadas en el mimetismo y en la intuición.

Este *modelo artesanal* presenta importantes diferencias con relación a los sistemas productivos posteriores, siendo las más importantes las siguientes:

- Ausencia de división sistemática del trabajo.
- La responsabilidad e iniciativas sobre la fabricación corresponden al artesano.
- El artesano mantiene una relación directa con el cliente.
- La calidad del producto corresponde al artesano.

### 1.3.2. Primer modelo industrial

Este modelo surge alrededor de la Revolución Industrial de la segunda mitad del siglo XVIII. En esta época, el pequeño taller artesanal va evolucionando, alejándose del entorno doméstico y apuntando hacia centros de fabricación seriada, o fábricas, con un mayor número de operarios y con unos planteamientos productivos y comerciales diferentes.

Con este modelo surgen otros problemas técnicos que demandan soluciones nuevas. Entre ellos cabe destacar los requerimientos de intercambiabilidad de las piezas y la separación entre la fabricación de componentes y el montaje de los mismos para la obtención de conjuntos complejos o máquinas.

El grado de mecanización relativo a la utilización de máquinas-herramienta universales llegó a consolidarse con bastante rapidez, y la máquina de vapor fue imponiéndose como la principal fuente de energía de la actividad industrial.

Con ello la localización de los talleres quedaba menos condicionada a la proximidad de cauces fluviales o en zonas con fuertes vientos. Además, el intento de utilización rentable de la máquina de vapor fue provocando una mayor concentración de maquinaria en los talleres.

La figura del ingeniero con un importante bagaje empírico, tanto en los aspectos técnicos como en los organizativos, fue de suma importancia en el país tecnológicamente más avanzado del período (Gran Bretaña), generalizándose posteriormente su tipificación profesional.

### 1.3.3. Segundo modelo industrial

Un punto de inflexión en la producción industrial viene a coincidir en el tiempo con la publicación, en 1911, de la obra de Frederic Winslow Taylor *The Principles of Scientific Management*, en la cual se plantea un enfoque analítico y científico de los problemas asociados a los procesos y sistemas de fabricación.

La implantación de este modelo provoca fuertes cambios en la organización productiva, llevando a cabo la *división del trabajo*, distribuyendo responsabilidades y elaborando protocolos y procedimientos escritos. Como consecuencia de dicha división del trabajo, aparecen nuevas figuras en el área productiva, tales como la del

capataz encargado de supervisar los productos y su adecuación a las especificaciones (supervisor de calidad).

También surgen, en este modelo, nuevos departamentos y unidades funcionales, como por ejemplo la oficina técnica, responsable de la programación de los procesos de fabricación, selección de procesos, máquinas-herramienta y herramientas, control de tiempos, etc.

Este modelo posibilita el auge de la automatización por ciclo fijo para, a partir de los últimos años de la década de los cuarenta, comenzar a iniciarse la automatización por ciclo programable de la mano de los primitivos controles numéricos. La energía eléctrica va desbancandó, paulatinamente, a la máquina de vapor en el accionamiento de la maquinaria de fabricación y va diversificándose el empleo de materiales, aunque prevaleciendo el predominio del acero como material tecnológico por excelencia.

#### 1.3.4. Modelo actual

Este modelo viene a corresponder a las décadas de los ochenta y noventa, del siglo actual, y se caracteriza por la existencia de una problemática compleja, cuyos principales aspectos pueden englobarse en los cuatro niveles siguientes:

- a) *Nivel de mercado*: cada vez más globalizado y con una competencia en aumento. También se tiene una mayor tecnificación y personalización de la demanda y una alta exigencia en materia de seguridad y calidad de los productos y servicios.
- b) *Nivel de recursos*: el encarecimiento de las materias primas, de los costes laborales y del precio del dinero, justifica el intento de alcanzar el máximo aprovechamiento de los recursos puestos en juego durante la fabricación, minimizando los inmovilizados y con tendencia a la subcontratación de las fabricaciones y servicios auxiliares.
- c) *Nivel de producto*: se tiene una oferta de productos cada vez más competitivos, y con una velocidad de obsolescencia en aumento. Por ello se considera la posibilidad de ampliación de la gama de productos a partir de un núcleo o diseño básico.
- d) *Nivel de tecnología*: se demanda una gran flexibilidad de los sistemas de fabricación y una alta rapidez de respuesta de los mismos, con la finalidad de adaptarse a la producción de los nuevos modelos. La rapidez de obsolescencia de la tecnología obliga a una importante actividad de formación y de reconversión del personal, así como a la experimentación y adopción de nuevas tecnologías.

Para hacer frente a la problemática indicada las tecnologías de fabricación deben responder con:

- a) Una mejora de su oferta con una gama más amplia y diversificada de productos y servicios de mayor calidad.

- b) Una importante reducción de costes, gracias al empleo de tecnologías que posibiliten una mayor productividad y flexibilidad.
- c) La utilización optimizada de los bienes de equipo y otros recursos productivos.
- d) El empleo de nuevas y más efectivas técnicas de gestión productiva.

Por lo tanto, el grado de automatización requerido a las máquinas-herramienta corresponde a las de ciclo programable, con una fuerte tendencia hacia la automatización inteligente.

Ambas soluciones han experimentado un espectacular desarrollo, de la mano de las tecnologías electrónica e informática a través de la tecnología del control numérico (CN), de las máquinas-herramienta y con la consolidación del ordenador como elemento imprescindible en la automatización de los procesos y sistemas de fabricación.

Los materiales de empleo tecnológico alcanzan una importante diversificación, no sólo en el campo de los materiales metálicos (aceros aleados, inoxidable y especiales, aleaciones ligeras, metales duros, etc.) sino fundamentalmente en el de los no metálicos (plásticos, cerámicos y compuestos, entre otros).

En el modelo actual se tiende hacia la consideración integrada de los distintos elementos que concurren en la actividad productiva y para ello se parte de la automatización global de células y sistemas de fabricación. Con ello se supera el concepto de automatización de la máquina-herramienta aislada y se avanza hacia la *fabricación integrada por ordenador (Computer Integrated Manufacturing o CIM)*.

#### 1.4. DESARROLLO DEL CONTROL NUMÉRICO

Como ya ha sido indicado, la evolución más reciente de las tecnologías de fabricación ha venido de la mano del *control numérico* (CN) y del empleo del *ordenador* en la gestión de los sistemas y operaciones productivas.

La aplicación del control numérico a las máquinas-herramienta surgió para posibilitar la fabricación de piezas de geometría compleja y alta precisión, demandadas por la industria aeronáutica militar. Ello tuvo lugar en el año 1942, recién incorporados los Estados Unidos de América (EUA) a la II Guerra Mundial, cuando la Bendix Corporation quiso fabricar una leva tridimensional para el regulador de la bomba de inyección de motores de aviación.

Dicha leva había sido diseñada para posibilitar un importante ahorro de combustible en los aparatos de combate, lo que redundaba en un incremento sustancial del radio de acción de los mismos, circunstancia ésta de enorme valor estratégico en la Batalla del Pacífico. Con las fresadoras convencionales disponibles resultaba imposible el mecanizado de la superficie curva espacial de la leva, dado que la trayectoria a seguir por la punta de la herramienta en su movimiento relativo con respecto a la pieza debía obtenerse componiendo desplazamientos variables y simultáneos en los tres ejes de la fresadora.

La solución adoptada se basó en el empleo de un calculador que permitía la generación de un elevado número de puntos de la trayectoria. Dicha información geométrica, transmitida a una fresadora con los accionamientos de los tres ejes accionables independientemente, posibilitaba el adecuado posicionamiento espacial de la punta de la herramienta para el mecanizado de la superficie de la leva.

Cinco años más tarde, en 1947, John C. Parsons concibe un control automático con entrada de información de carácter numérico, también para una máquina-herramienta de tipo fresadora. La información de entrada utilizada era soportada en tarjetas perforadas y el control traducía dicha información en señales de mando a los accionamientos de dos de los ejes de la máquina. Este sistema fue denominado «*Digitron*» y gracias a él la Parsons Corporation de Michigan pudo aumentar su volumen de producción de palas para rotores de helicóptero, a pesar de ir a diseños más complejos de las mismas.

A partir de este momento, la automatización de las máquinas-herramienta va a discurrir paralela al desarrollo de los ordenadores. Cabe recordar que el primer ordenador electrónico digital, el ENIAC, data de 1946.

En 1949, los requerimientos de componentes de difícil mecanización por parte de la United States Air Force (USAF) eran importantes. La realización de estos mecanizados mediante copiado no resultaba rentable, debido a que debían ser retocados a mano, obteniéndose bajas precisiones y altos porcentajes de piezas desechadas. En la búsqueda de soluciones a este problema la USAF solicitó la colaboración de la Parsons Co. y del Servomechanisms Laboratory del Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Esa colaboración vino a posibilitar que en 1952 finalizara la puesta a punto de la primera *máquina-herramienta con control numérico* (MHCN), en el sentido actual del término (precisamente la denominación *numerical control* fue acuñada en el MIT). Dicha máquina era del tipo fresadora y derivaba de un modelo convencional de la Cincinnati Milling Machine Company. El control estaba aplicado a sus tres ejes con capacidad de funcionamiento simultáneo en dos de ellos.

A partir de ese momento y hasta nuestros días, la generalización del empleo de las MHCN ha sido muy importante. Ya en la edición de 1955 del Machine Tool Show de Chicago, eran siete las firmas norteamericanas que presentaban modelos de MHCN. Esas primeras máquinas comerciales de control numérico solían ser fresadoras con entrada de información mediante lectores de tarjetas y de cinta perforada, y carentes de un lenguaje específico debidamente estructurado y asequible. Por ello su programación resultaba sumamente engorrosa y precisaban personal altamente cualificado.

A lo largo de 1956, la USAF efectuó un pedido de 170 MHCN a tres importantes fabricantes americanos de máquinas-herramienta: Cincinnati Milling Machine, Gidding & Lewis y Kearney & Trecker. De ellas, unas 120 correspondían a modelos de fresadora de bancada fija para el mecanizado de paneles, largueros y estructuras de alas de avión.

En los años 1956 y 1957 se presentaron las primeras patentes de robots en EUA y en Gran Bretaña, respectivamente. El inventor norteamericano era George C. Devol y el británico Cyril W. Kenward. Devol siguió desarrollando trabajos en esa línea, gracias a los cuales, Joseph F. Engelberger construyó el primer robot industrial en 1959.

Ya en 1961, se tiene la instalación, por parte de la firma Unimate, del primer *robot* para operar en un entorno de fabricación, concretamente para la descarga de piezas en procesos de fundición en coquilla en una planta de motores de automoción de la General Motors.

Paralelamente al desarrollo experimentado en la implementación de sistemas de control numérico en fresadoras de tres ejes, algunos fabricantes iniciaron la aplicación de tales controles a máquinas-herramienta de movimientos más sencillos, principalmente tornos (que requerían el control únicamente en dos ejes) y taladradoras (que necesitaban el posicionamiento en vacío en dos ejes y mecanizaban gracias a un movimiento lineal, según un tercer eje perpendicular a los anteriores).

Ello hace que durante los primeros años de la década de los sesenta se generalice la incorporación de controles numéricos a distintos tipos de máquinas-herramienta, así como el empleo de las mismas en las fabricaciones mecánicas. Buena muestra de esta tendencia queda reflejada en el hecho de que en el Machine Tool Show de Chicago de 1965 llegaron a presentarse más de 150 modelos distintos de máquinas-herramienta controladas numéricamente.

En el campo del *software* para control numérico surge en EUA en 1961 el primer sistema genérico de programación automática, asistida por ordenador, para máquinas-herramienta con control numérico. Se trata del lenguaje APT (Automatically Programmed Tooling).

El desarrollo de la tecnología informática, junto con los avances en robótica y en programación automática de máquinas de CN, va a permitir el desarrollo de *células de fabricación flexible* (FMC) y, posteriormente, de *sistemas de fabricación flexible* (FMS). Concretamente en 1967, la firma Ingersoll-Rand procede a la instalación del primer FMS estadounidense. Previamente, habían sido efectuadas diversas aproximaciones a este tipo de sistemas en Gran Bretaña y Suecia, si bien con un nivel de desarrollo inferior.

A partir de los últimos años de la década de los sesenta, las industrias europea y japonesa (ésta algo más tarde, pero con mucha mayor agresividad), así como —más recientemente— la de otros países asiáticos, pasan a incorporarse al fenómeno de producir y utilizar masivamente MHCN y robots.

En la actualidad destaca la gran asimilación efectuada tanto del control numérico como del empleo de robots y ordenadores en los procesos de fabricación. Todo ello conduce a la necesidad de mejorar las comunicaciones internas de la fábrica para la gestión y transmisión de la información tecnológica. Ésta no queda restringida a las labores específicas de fabricación, sino que debe incorporar las de las actividades conexas, principalmente el *diseño* y la *calidad*.

En lo que respecta a nuestro país, los primeros desarrollos llevados a cabo en este campo han sido protagonizados por la industria vasca de la máquina-herramienta, siendo sus hitos más significativos los recogidos en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Primeros desarrollos nacionales del CN

Año	Empresa/Feria	Máquina/desarrollo
1969	Duñaiturria y Estancona (DYE)	Fresadora puente para CN destinada a la industria aeronáutica. Exportada a EUA sin el control.
1969	DYE	Fresadora puente con CN extranjero, montada íntegramente por DYE.
1974	Guztiok' Bat	Primer torno nacional de CN.
1974	Anayak	Primera fresadora de torreta con CN.
1976	Kondia	Primer centro de mecanizado de husillo vertical nacional.
1983	Anayak	Primeros centros de mecanizado de husillo horizontal y manutención automática por palets.

En los años sucesivos, en cuanto a la producción mundial y nacional de máquina-herramienta se refiere, se observa que éstas crecen de una forma ininterrumpida desde 1984 hasta 1990, según se muestra en la tabla 1.2, año en el que se produce un cambio en la tendencia registrándose significativas caídas de producción que hay que atribuirles fundamentalmente a la crisis económica atravesada en dichos años, que repercutió de una forma directa en las inversiones realizadas en dicho campo.

Tabla 1.2. Producción de MH (en millones de US\$)

Año	Producc. Mundial	Producc. Nacional
1984	19870,6	211,5
1985	21970,6	252,9
1986	28890,7	396,6
1987	33081,5	575,0
1988	37934,9	673,6
1989	42473,9	806,3
1990	45281,6	1014,8
1991	42946,9	750,6
1992	34088,9	610,5
1993	28247,9	401,2

Según los datos que se representan en la tabla anterior se observa que la reducción de la producción nacional experimentada durante 1991-1993 (60,46%) es muy superior a la del conjunto mundial (37,6 %).

Posteriormente, durante 1994 se observa una significativa recuperación con relación al año anterior, experimentándose un importante crecimiento en el sector de la producción de máquina-herramienta.

Asimismo, durante 1995 y 1996 existe una progresiva recuperación, que se muestra reflejada en las 1200 empresas que exponen en la 19 BIEMH.

Actualmente, se sigue observando una tendencia creciente en las inversiones realizadas en el sector de la máquina-herramienta, que se puede observar en las más de 1600 empresas expositoras que acuden a la 20 BIEMH de 1998.

Resultan de interés los avances tecnológicos en la mecanización de alta velocidad, torneado de metales, rectificación con muelas de PCBN (policarbonato de nitruro de boro), innovaciones en las máquinas de deformación metálica, etc.

Por último señalar que los esfuerzos desarrollados en la investigación y desarrollo de máquinas-herramienta han conducido a revolucionarios avances en la fabricación de máquinas-herramienta de control numérico, como por ejemplo, la estructura configurada por seis pies, *hexápodo*.

Estas máquinas representan un cambio radical en los fundamentos básicos del diseño de las mismas que supera las limitaciones intrínsecas en cuanto a rigidez, velocidad, flexibilidad y modularidad que tradicionalmente van asociadas a las estructuras convencionales.

Con ello, se avanza en el desarrollo de máquinas-herramienta más veloces, más rígidas y precisas a la vez que con menor masa y, por lo tanto, con menores costes constructivos.

Sin embargo, falta por demostrar que la estructura tal y como se la dimensiona, sea capaz de soportar las fuerzas generadas en el mecanizado o las cargas de inercia que aparecen a elevadas velocidades y aceleraciones y que generalmente van asociadas a un aumento de las vibraciones, siendo éste un gran obstáculo para alcanzar elevadas precisiones y acabados superficiales óptimos.

## 1.5. FABRICACIÓN FLEXIBLE

La búsqueda de nuevas concepciones en el desarrollo de los sistemas de fabricación ha conducido a la automatización de los procesos de fabricación, a la vez que al desarrollo de sistemas de control que permitan una gestión eficaz de los mismos.

Esta automatización no se debe limitar únicamente a aumentar la productividad del sistema, sino que, además, debe permitir una cierta capacidad de adaptación a programas de fabricación distintos.

En este aspecto cabe señalar que los sistemas de fabricación flexible representan una de las soluciones más avanzadas a la problemática anteriormente expuesta.

Según la norma [ISO/CEI 2382-24:1995], se considera a un sistema de fabricación flexible como «aquél compuesto por unidades de fabricación controladas por control numérico y mecanismos de transporte que permiten, mediante ajustes sencillos, realizar cambios en las tareas de fabricación».

Una definición muy similar aparece en la misma norma para describir a una célula de fabricación como: «el sistema de fabricación compuesto por un número de estaciones de trabajo, materiales, elementos de almacenaje y mecanismos de transporte que los interconectan».

Dentro de los sistemas de producción para la fabricación automatizada, podemos realizar, entre otras, la siguiente clasificación:

- Sistemas diseñados para la fabricación de un único tipo de producto.
- Sistemas flexibles de fabricación, que son capaces de adaptarse a distintos planes de producción para la fabricación de productos distintos.

El origen de los sistemas de fabricación flexible puede centrarse en los grandes sistemas de producción automatizada, caracterizados a la vez que por su elevado grado de automatización, por su elevada rigidez, lo que originaba grandes costes estructurales ante variaciones en los planes de producción.

Aunque el adjetivo *flexible* empieza a aplicarse a los sistemas de fabricación a finales de la década de los años sesenta y principios de los setenta, relacionado con un grupo de sistemas de fabricación desarrollados para su aplicación a procesos de arranque de material, es hacia la mitad de la década de los años setenta cuando comienza a generalizarse la denominación de sistemas de fabricación flexible a éstos y a otros sistemas de características similares, que involucraban filosofías de fabricación tan modernas como los propios sistemas, denominándose como *sistemas de fabricación flexible* (SFF).

Actualmente, la evolución en los sistemas de fabricación se orienta hacia el desarrollo de tecnologías integradas que proporcionen un alto grado de flexibilidad, caracterizadas por la automatización de sus componentes y por el control por ordenador de los sistemas de fabricación, facilitando así la producción de una gran variedad de productos.

Para conseguir el objetivo final de la integración de las máquinas-herramienta en un entorno de fabricación flexible, se ha de proceder en dos etapas:

1. Implementar las comunicaciones individuales de cada máquina con el ordenador de célula, para el control, la supervisión y la gestión.
2. Integrar todo el conjunto de máquinas y elementos de la planta bajo la supervisión, gestión y control de un ordenador de planta.

Asimismo, es preciso el empleo de técnicas que agrupen de una forma óptima las máquinas-herramienta en función de las operaciones de mecanizado que se vayan a realizar. De esta manera es posible configurar un sistema de fabricación que optimice la disposición de las MHCN y los sistemas de intercambio empleados, aumentando con ello la productividad.