
Fabricación asistida por ordenador (CAM)

PID_00253862

Joan Vivancos Calvet
Joan Ramon Gomà Ayats

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 3 horas



**Joan Vivancos Calvet**

Doctor Ingeniero Industrial, Catedrático de Universidad de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y ha sido Presidente de la Comisión Delegada de la Fundación Privada Centro CIM, Director del Laboratorio Común de Ingeniería Mecánica de la UPC, Subdirector del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPC, Responsable del Grupo de Investigación en Tecnologías de Fabricación (TECNOFAB) de la UPC, Responsable del Grupo de Tecnologías de Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la UPC, Responsable y Coordinador de la Intensificación en Fabricación de la Titulación de Ingeniería Industrial de la ETSEIB, Director del Programa Máster: Producción e Ingeniería Integradas por Ordenador (CIME) (450 horas) de la UPC, impartido en el Centro CIM, Director del Programa Máster: Producción Automatizada y Robótica (PAIR) (450 horas) de la UPC, impartido en el Centro CIM. Actualmente está jubilado.

**Joan Ramon Gomà Ayats**

(Santa Coloma de Gramenet, 1960). Doctor ingeniero industrial, profesor agregado del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña en la especialidad de procesos de fabricación. Es miembro del grupo de investigación de tecnologías de la producción de la UPC (TECNOFAB) y hasta diciembre de 2009 fue director general de la Fundación Centro CIM.

Índice

Introducción.....	5
1. Descripción de los sistemas CAM.....	9
1.1. Definición	9
1.2. Proceso de trabajo con un paquete CAM	10
1.3. Elementos de un programa CAM	11
1.3.1. Entorno de trabajo	11
1.3.2. Almacenamiento de los procesos	12
1.3.3. Otras prestaciones	13
1.4. Procesos en los que se aplican los paquetes CAM	14
1.5. Introducción de la geometría de la pieza	15
1.6. Condiciones tecnológicas	16
1.7. Cálculo del recorrido de la herramienta	17
1.7.1. Torneado	17
1.7.2. Torno con 2 torretas	19
1.7.3. Tornos con torreta motorizada	20
1.7.4. Operaciones punto a punto	20
1.7.5. Operaciones con 2,5 ejes	21
1.7.6. Operaciones con 3 ejes	23
1.7.7. Operaciones con 4 y 5 ejes	25
1.7.8. Programación del recorrido de la herramienta en máquinas con alta velocidad	26
1.8. Traducción del programa al lenguaje del control	26
1.9. Tendencias futuras	27

Introducción

Si bien la ayuda del ordenador en los procesos productivos inicialmente se centró en la parte de administración y gestión, y más tarde se aplicó a la ingeniería de producto apareciendo los sistemas CAD (*computer aided desing*) y CAE (*computer aided engineering*), actualmente se tienen ya muchas aplicaciones en el campo de la ingeniería del proceso y en la fabricación, tanto desde el punto de vista del diseño y la planificación del proceso de fabricación, como desde el punto de vista del control a nivel de planta de fabricación.

Así, dentro de los sistemas productivos, la aplicación de los sistemas informáticos ha llegado a todas las áreas: dirección, gestión, ingeniería del producto, ingeniería del proceso, control de calidad, compras, ventas, personal, administración, etc., y tanto su utilización como el grado y nivel de aplicación se han incrementado progresivamente.

En cuanto a la fabricación, uno de los niveles de aplicaciones asistidas por ordenador corresponde a la transferencia, la interpretación y el mantenimiento de datos relativos a la fabricación, que implica operaciones de control de inventarios, monitorización de las máquinas, sistemas de información de la dirección, control de tiempos, etc.

Otro nivel corresponde a aquellas aplicaciones que están relacionadas con la ingeniería de procesos y que se encuadran dentro del concepto CAM (*computer aided manufacturing*), tales como:

- Generación de programas de control numérico para máquinas controladas con control numérico computerizado.
- Programación *off-line* de robots.
- Planificación de procesos de fabricación.
- Simulación de procesos de fabricación.
- Documentación de taller.
- DNC (*distributed numerical control*), comunicaciones entre ordenadores y controles numéricos computerizados.
- Etc.

La aplicación que más se ha generalizado bajo las siglas CAM es la generación de programas de control numérico con la ayuda del ordenador, basándose en el dibujo de la pieza, generado también con ordenador mediante un sistema CAD externo o integrado con el sistema CAM, o bien con un mínimo de herramientas CAD que tenga el propio sistema CAM.

El objetivo final de estos sistemas CAM es la obtención de programas de control numérico para máquinas controladas con controles numéricos computerizados. Pensando, por ejemplo, con las máquinas herramienta, los programas de control numérico contienen toda la información y las instrucciones codificadas necesarias para controlar el desplazamiento relativo de la herramienta respecto a la pieza en bruto a fin de obtener la pieza acabada, y además contienen todas las instrucciones para controlar todas las demás funciones de la máquina.

En estos sistemas CAM, se utiliza el ordenador para evitar al programador básicamente los cálculos geométricos necesarios para definir el contorno de la pieza y el recorrido de la herramienta, y para simplificar la codificación bloque a bloque en lenguaje máquina, normalmente código ISO de control numérico. A partir de la geometría de la pieza, en general introducida procedente de un CAD, con unas pocas instrucciones dadas por el operador, el sistema calcula las trayectorias de la herramienta para cada tipo de operación de mecanizado que se quiera realizar.

Normalmente, es necesario que el operador decida el tipo de operaciones de mecanizado que tiene que realizar y el orden, las herramientas que se han de utilizar y las condiciones de corte correspondientes, todo esto con alguna ayuda del sistema en algunos CAM. En cuanto a los recorridos de las herramientas, en general el operador tiene que decidir, para cada operación, por dónde se quiere entrar a mecanizar y, si es necesario, en qué sentido se quiere hacer, y además tiene que decidir entre otras opciones que puede haber.

Con todo esto, el sistema genera el programa pieza con el lenguaje y formato propios del sistema CAM, el cual permite realizar la simulación e introducir las modificaciones que sean necesarias. Una vez que el programa es correcto, se realiza el posprocesado para traducirlos al lenguaje y formato propios del control numérico computerizado donde se ha de ejecutar.

El interés de aplicar estos sistemas CAM es tanto mayor cuanto mayor sea la complejidad de la geometría de la pieza que mecanizar o que cortar, ya que en muchos casos no es posible realizar el correspondiente programa de control numérico manualmente, sin la ayuda del ordenador.

Existen sistemas CAM con módulos específicos para distintas tecnologías o aplicaciones, tales como para tornos, para fresadoras, para rectificadoras, para punzonadoras, para electroerosión con electrodo, para electroerosión con hilo, para corte con láser o con chorro de agua a alta presión, etc.

El objetivo del presente material es dar a conocer lo que son, cómo funcionan y qué prestaciones pueden tener los sistemas CAM actuales, enfocado a que sea una herramienta de ayuda a la hora de valorar y seleccionar el sistema CAM más adecuado para unas ciertas necesidades.

Se realiza un estudio y análisis de los sistemas CAM dedicados básicamente a las máquinas herramienta. En el primer apartado se describen los sistemas CAM en cuanto a los elementos que los componen y a las funciones que pueden realizar, y en el segundo se hace un compendio de todas las prestaciones y características que pueden tener estos sistemas, con breves comentarios, a fin de tener unos parámetros que sirvan para poderlos valorar de manera objetiva.

1. Descripción de los sistemas CAM

1.1. Definición

La expresión CAM (*computer aided manufacturing*) se refiere al uso de sistemas informáticos para facilitar el control físico del proceso de fabricación.

Con la introducción en las industrias de las máquinas herramienta del control numérico computerizado, los robots, los almacenes automáticos, los vehículos guiados automáticamente, etc., se consiguen importantes ventajas sobre los métodos de producción tradicionales y se consigue fabricar series intermedias de piezas a costes comparables a los de las grandes series. Esto abre las puertas a nuevos enfoques en la organización de la producción, como el JIT, y también hace surgir nuevas necesidades, siendo la más inmediata la de obtener los programas para gobernar estas máquinas.

La creación de programas para estas máquinas puede hacerse almacenando en un soporte magnético una lista de instrucciones en el código que las máquinas son capaces de decodificar y ejecutar. De hecho, así es como se hace en muchas ocasiones, pero han ido surgiendo una serie de aplicaciones informáticas que pretenden facilitar esta tarea al operador.

Entre estas aplicaciones se halla la programación *off-line* de robots, que consiste en obtener el programa de control del robot a partir de un modelo informático del robot y del entorno que lo rodea.

Algunos autores incluyen también dentro del ámbito del CAM los programas de supervisión y control del proceso de producción cuando estos programas se sustentan sobre la comunicación con los controles numéricos de los equipos de la planta.

Pero la aplicación que más se ha generalizado bajo las siglas de CAM es la de obtener programas de control numérico para máquinas herramienta con ayuda del ordenador, apoyándose en el dibujo de la pieza, realizado también con el ordenador. A partir de aquí se centrará en esta aplicación el significado de las siglas CAM y se profundizará en su discusión.

En la figura 1 se muestran las trayectorias de la herramienta, calculadas y simuladas en un sistema CAM, para mecanizar una pieza y se presenta parte del correspondiente programa de control numérico generado. En la figura 2 se ve un detalle del mecanizado de dicha pieza, en un centro de mecanizado, a partir del programa de control numérico generado por el sistema CAM.

1.2. Proceso de trabajo con un paquete CAM

El objetivo final de un sistema CAM es la obtención de un programa de control numérico para una máquina herramienta. Los programas de control numérico de las máquinas herramienta permiten, principalmente, controlar el desplazamiento relativo de la herramienta respecto a la pieza en bruto para provocar la producción de la pieza acabada, y además controlan todas las demás funciones de la máquina.

Se comprende que para alcanzar su objetivo es fundamental disponer de un modelo de la pieza acabada; por ello, el primer paso dentro del proceso de trabajo con cualquier paquete CAM es introducir o importar la geometría de la pieza.

El segundo paso consiste en definir el proceso de mecanizado, apoyándose en la geometría de la pieza acabada, y eventualmente en algunos programas, en la de la pieza en bruto.

El proceso de mecanizado conceptualmente se puede considerar dividido en dos tipos de operaciones, las que provocan el desplazamiento de la herramienta y las que definen las condiciones tecnológicas de trabajo (velocidad de corte, cambio de herramienta, puesta en marcha de la bomba de refrigerante, etc.).

Figura 1. Trayectorias de la herramienta, calculadas y simuladas en un sistema CAM, para mecanizar la pieza, y parte del correspondiente programa de control numérico

```
F1250
G00X17.36
G00Y0.00
G01X279.49Y-215.29Z-68.16
F1500
G01X279.76Y-215.29Z-68.18
X281.57Y-215.69Z-68.34
X280.77Y-215.69Z-68.28
X279.85Y-215.69Z-68.20
X279.23Y-215.69Z-68.15
X279.23Y-216.09Z-68.16
X280.17Y-216.09Z-68.24
X281.10Y-216.09Z-68.31
X282.04Y-216.09Z-68.39
X282.33Y-216.49Z-68.42
X281.58Y-216.49Z-68.36
X280.84Y-216.49Z-68.30
X280.09Y-216.49Z-68.24
X280.74Y-216.89Z-68.30
X281.37Y-216.89Z-68.35
X281.99Y-216.89Z-68.40
X282.62Y-216.89Z-68.45
X282.98Y-217.29Z-68.49
X282.38Y-217.29Z-68.44
X281.78Y-217.29Z-68.40
X281.17Y-217.29Z-68.35
X281.54Y-217.69Z-68.39
X282.11Y-217.69Z-68.43
X282.69Y-217.69Z-68.48
X283.27Y-217.69Z-68.52
X283.63Y-218.09Z-68.56
X283.03Y-218.09Z-68.51
X282.42Y-218.09Z-68.47
X281.82Y-218.09Z-68.42
X282.18Y-218.49Z-68.46
X282.76Y-218.49Z-68.50
X283.34Y-218.49Z-68.55
X283.92Y-218.49Z-68.59
X284.20Y-218.89Z-68.63
X283.63Y-218.89Z-68.58
```

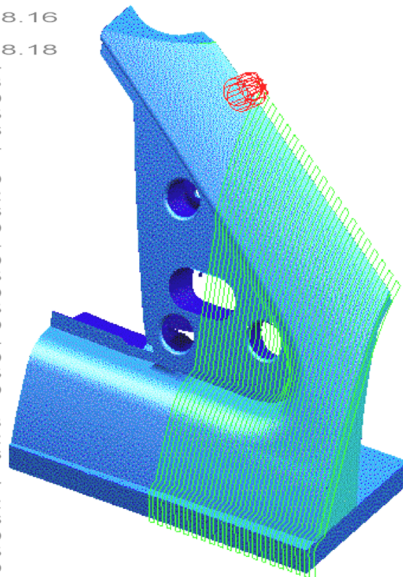
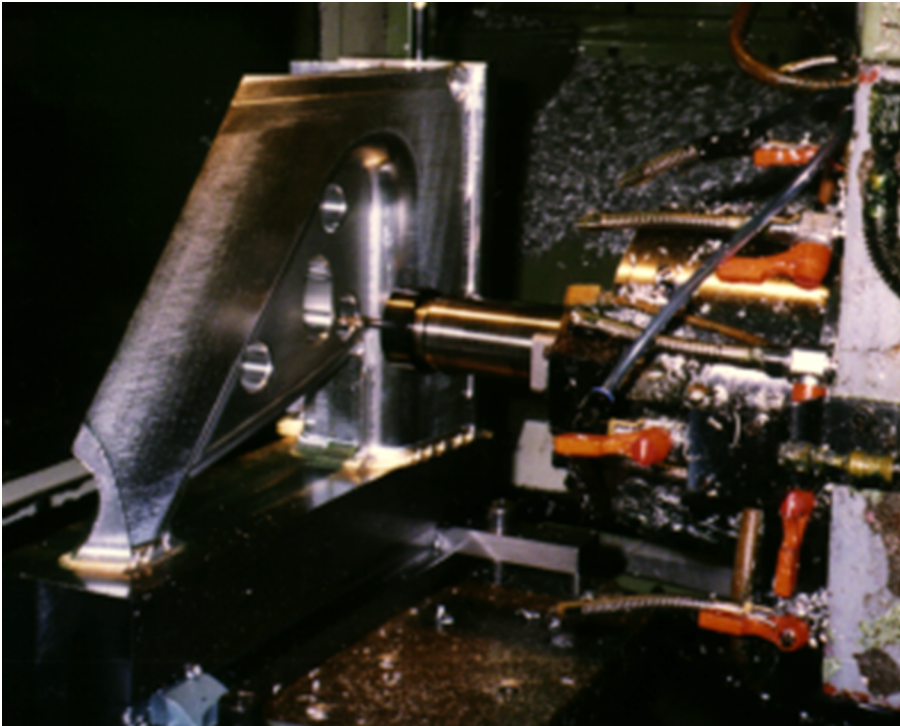


Figura 2. Mecanizado de la pieza, en un centro de mecanizado, a partir del programa de control numérico generado en el sistema CAM



El resultado de definir el proceso de mecanizado se almacena en la memoria del ordenador en un formato adecuado para ser consultado, modificado, visualizar el proceso, etc., y además se trabaja siempre sobre una máquina virtual más o menos genérica. Para que el programa generado pueda ser ejecutado en una máquina concreta, hay que traducirlo teniendo en cuenta las restricciones y características del control y de la máquina concreta en que se fabricará la pieza. Este es el último paso (posprocesado) que proporciona el objetivo perseguido: obtener el programa de control numérico para una cierta máquina y un determinado control numérico computerizado.

1.3. Elementos de un programa CAM

Cada programa da una solución concreta a las necesidades que surgen para realizar el proceso descrito en el apartado anterior, pero existen unos elementos comunes que de una u otra manera tocan todos ellos y que son los que se comentan a continuación.

1.3.1. Entorno de trabajo

En todos los sistemas CAM los instrumentos de los que dispone el operador para comunicarse con el programa consisten en una ventana gráfica y unos comandos.

La ventana gráfica cumple la función de representar la pieza que queremos obtener y en algunos casos la pieza en bruto de la que se parte. Además, permite que se seleccionen con el ratón los elementos gráficos cuando es necesario

hacer referencia a ellos como parte de los comandos. También es en la ventana gráfica donde se produce la animación del movimiento de la herramienta cuando se realiza la simulación del mecanizado.

Los comandos son las instrucciones que introduce el operador para definir el proceso de mecanizado. Existen diversos métodos, según los distintos programas, para introducir los comandos, coexistiendo en algún programa varios de ellos.

Los métodos para introducir los comandos pueden ser: diálogo, menú o formulario.

El método de diálogo consiste en que el operador teclea frases en un lenguaje propio de cada programa con las que define cada una de las operaciones del proceso de mecanizado. Si alguna frase requiere concreción o indicar algún elemento gráfico, el programa realiza las oportunas preguntas hasta que la operación queda definida.

Los menús son estructuras arborescentes en las que están agrupadas todas las operaciones que pueden realizarse con el programa. El operador elige la que desea ejecutar en cada momento descendiendo entre los distintos niveles del árbol. Las opciones pueden presentarse en modo textual o iconográfico dependiendo de cada programa. Normalmente, las operaciones que pueden seleccionarse por el menú son incompletas y después de seleccionadas se pasa a una ventana de diálogo o a un formulario para acabar de completar toda la información necesaria para ejecutarlas.

Los formularios surgen normalmente como complemento de las instrucciones tecleadas en una ventana de diálogo o seleccionadas a través de un menú. Consisten en una ventana donde se presentan todas las opciones disponibles dentro de una operación y se requiere respuesta a cada una de ellas.

1.3.2. Almacenamiento de los procesos

La información que define un proceso de mecanizado podría representarse mediante una película en la que se visualizasen todas las operaciones que realiza la máquina al hacer el mecanizado.

Por su propia naturaleza, esta información posee un componente temporal y es difícil representarla en una pantalla gráfica de un ordenador. Los diversos programas CAM han dado distintas respuestas a la problemática de almacenar y representar el proceso de mecanizado que se va definiendo en ellos.

Los principales métodos de almacenamiento del proceso de mecanizado son: gráfico, textual y lenguaje de control numérico.

En el método gráfico, a medida que se definen operaciones se crean líneas que corresponden al recorrido que realiza el punto de referencia de la herramienta (normalmente la punta o el centro de la punta de la herramienta). Este método se emplea normalmente por parte de aquellos programas que están orientados a la definición del desplazamiento de la herramienta, y que dejan en segundo término los cambios de herramienta y las condiciones tecnológicas. En algunos programas estas líneas son unas entidades especiales que contienen una etiqueta en la que se guarda la información referente a la herramienta con la que se ha realizado, la velocidad de corte, el uso del refrigerante, etc.

El método textual consiste en crear un fichero en el que se almacenan los comandos que se van ejecutando para definir el proceso. Este método presenta la ventaja de que las entidades gráficas en las que se apoya la definición del recorrido de las herramientas están referenciadas por su nombre o etiqueta, y como consecuencia el programa sigue funcionando aunque se realicen ciertas modificaciones en las entidades del dibujo.

Por último, algunos programas van traduciendo, a medida que se introducen los comandos, a código en lenguaje de la máquina y lo almacenan en este formato. Estos programas son extremadamente dependientes de la máquina, pero como contrapartida eliminan la necesidad de traducir posteriormente el programa.

1.3.3. Otras prestaciones

No basta con que un sistema CAM sea capaz de crear programas de control numérico; además, es necesario por lo menos que disponga de herramientas para comprobar que el programa que se ha definido realiza lo que se desea que realice (algunos sistemas ofrecen prestaciones adicionales).

La mayoría de los sistemas cuando realizan una operación de desplazamiento de la herramienta la calculan teniendo en cuenta que el filo de corte se mantenga permanentemente tangente a la superficie de la pieza que mecanizar. Esto no garantiza que partes de la herramienta o del cabezal, alejadas del filo de corte, no colisionen con la pieza, tampoco garantiza que toda la superficie de la pieza quede mecanizada. Para detectar estos problemas, las prestaciones que ofrecen los distintos sistemas son la simulación y el análisis del proceso de mecanizado y la detección de colisiones.

La simulación del proceso de mecanizado consiste en reproducir en el ordenador el proceso que realizaría la máquina. En algunos casos se limita a presentar una "película" del desplazamiento de la herramienta durante el trabajo, en otros además puede dejarse una huella en la pantalla de las zonas por las que pasa y en otros puede conseguirse una imagen de cómo va quedando la pieza en bruto después de cada operación.

La detección de colisiones consiste en aproximar la herramienta por un cono o un tronco de cono y calcular si las partes alejadas colisionan con la pieza o no y dónde.

Además, en general los sistemas ofrecen otras prestaciones, como el cálculo del tiempo de ejecución de los programas, si se introducen las condiciones de corte para cada operación. Este valor no puede ser nunca exacto porque en el CAM se trabaja con una máquina virtual sin limitación de potencia y con aceleraciones infinitas, y en las máquinas reales el tiempo de mecanizado será siempre mayor que el calculado.

1.4. Procesos en los que se aplican los paquetes CAM

En el mercado hay disponibles un gran número de soluciones CAM para diversos procesos de fabricación, pero en general se encuentran programas para aquellas máquinas en las que sea importante controlar el recorrido de los ejes para determinar la pieza que se va a fabricar.

Los procesos clásicos de aplicación de los paquetes CAM son los siguientes:

- Torneado, tanto para los tornos habituales de una torreta (2 ejes), como para los de dos torretas (4 ejes: 2 ejes por 2 torretas), como para los centros de torneado (con torreta motorizada y eje C).
- Fresado, tanto para fresadoras como para centros de mecanizado, existiendo soluciones para:
 - Operaciones punto a punto, que son aquellas en las que la herramienta se posiciona, moviéndose dentro de un plano sin cortar y posteriormente realiza la operación de corte mientras se desplaza a lo largo de un eje.
 - Operaciones de 2,5 ejes, que son aquellas en las que el corte de material se realiza con el movimiento sincronizado de dos ejes como máximo.
 - Operaciones de 3 ejes, en las que la herramienta mientras está cortando puede moverse de forma sincronizada en las tres direcciones del espacio.
 - Operaciones de 4 y 5 ejes. En este tipo de operaciones además puede controlarse la orientación relativa entre la pieza y la herramienta mediante la rotación alrededor de uno o dos ejes, ya sea del cabezal portaherramientas, ya sea de la mesa en la que se sujeta la pieza o de ambos sincronizados.
- Electroerosión de penetración. En su aplicación clásica, este tipo de operación es análoga al de las operaciones punto a punto de los centros de mecanizado. Pueden también variar la orientación del electrodo.
- Electroerosión con hilo, con el control de 4 y 5 ejes.
- Punzonado, correspondiente a operaciones punto a punto controlando 2 ejes. En este caso la aplicación de un sistema CAM permite punzonar contornos no regulares.

- Corte con láser, con chorro de agua a presión, etc.

Hay otros procesos en los que pueden encontrarse paquetes específicos de CAM, pero en general el interés de estos productos será directamente proporcional a la complejidad del recorrido a seguir por la herramienta, lo cual dificulta la programación directa y por lo tanto hace más atractivo el empleo de estos sistemas.

1.5. Introducción de la geometría de la pieza

Como se ha comentado, es imprescindible para el funcionamiento de un sistema CAM disponer de un modelo de la pieza que queremos fabricar para poder referirse a él al definir el recorrido de las herramientas.

Además, durante el trabajo, definiendo el proceso de mecanizado se hace necesario utilizar una serie de herramientas propias de los sistemas de CAD (*computer aided design*), como pueden ser ampliaciones de la pieza (*zoom*), rotaciones, etc. Por este motivo, todos los paquetes CAM del mercado o bien disponen de un módulo CAD o bien se integran con uno de otro proveedor, del cual toman las prestaciones gráficas.

La introducción de la geometría de la pieza consiste en introducirla en el CAD con el que se integra el CAM. Las formas de conseguir esto son o a partir del CAD, o mediante palpado de superficies con máquina de medir tridimensional, o a partir de programas de control numérico preexistentes.

La introducción de la geometría a partir del CAD puede hacerse utilizando las herramientas de las que disponga para realizar el dibujo o importándolo desde otro programa de CAD, con lo que se entra en la problemática de transferencia de ficheros gráficos entre programas de CAD vía formatos estándar (IGES, VDA, DXF, SAT, etc.) o vía conversores directos.

El palpado continuo de superficies con máquina de medir tridimensional o fresadora con palpador proporciona el recorrido del centro de la bola del palpador al barrer la superficie de un modelo, y existen en algunos paquetes herramientas para inferir la superficie de la pieza a partir de esta información.

A partir de programas de control numérico preexistentes es una técnica análoga a la anterior, pues un programa de control numérico contiene la información del recorrido seguido por la punta de la herramienta (una bola) al barrer la superficie de la pieza, y esta técnica permite recuperar en el sistema CAM las piezas obtenidas con programas escritos por otros sistemas o escritos a mano.

1.6. Condiciones tecnológicas

Dentro de las condiciones tecnológicas, se agrupan todas aquellas decisiones y acciones que hemos de adoptar para la mecanización de una pieza aparte del recorrido de la herramienta.

Enumerándolas por orden cronológico son: elegir las fases de mecanizado, establecer el orden de las operaciones en cada fase, seleccionar la herramienta de cada operación y establecer las condiciones de corte de cada operación.

Una fase de mecanizado es el conjunto de operaciones que se realizará en una pieza en una determinada máquina una vez fijada en una determinada posición; por lo tanto, elegir las fases de mecanizado significa decidir por qué máquinas pasará una pieza, en qué orden, cuántas veces y en qué posición se fijará en cada máquina y qué operaciones se realizarán en cada fijación. Hoy por hoy no existe ningún sistema CAM que ofrezca ayuda al operador para tomar este tipo de decisiones.

Dentro de una fase de mecanizado el orden de las operaciones en general también será responsabilidad del operador, pero en algunos casos concretos se encontrarán ayudas en algunos sistemas CAM. Estos casos son la solución del problema del camino mínimo en las operaciones punto a punto, ayudas para distribuir las operaciones entre las torretas de un torno de dos torretas, y programas que representan la pieza en bruto y cómo va quedando después de cada operación.

En la selección de la herramienta para cada operación, hay que distinguir el concepto de herramienta lógica, el de orden de selección de herramienta y el de orden de cambio de herramienta.

La herramienta lógica sirve para que el sistema CAM disponga de los datos necesarios para calcular la posición de la herramienta para que su filo de corte se mantenga tangente a la superficie de la pieza que vamos a mecanizar, y esencialmente debe contener información acerca de la forma del filo de corte de la herramienta y de la posición relativa en la que se monta respecto al cabezal.

La orden de selección de herramienta es una instrucción que se transfiere al programa para la máquina y que provoca que el almacén automático de herramientas se posicione para que quede accesible la próxima herramienta a utilizar, pero en general esta no se coloca en el cabezal de la máquina.

La orden de cambio de herramienta es también una instrucción que se transfiere al programa de la máquina y que provoca que la herramienta se coloque en condiciones de trabajar.

Los apoyos para el operador en la selección de herramientas que ofrecen los paquetes actuales, si los tienen, se limitan a tener el fichero de herramientas clasificado según el tipo de operación e impidiendo que se utilicen para operaciones inadecuadas a cada una.

En cuanto a las condiciones de corte, se trata de decidir la velocidad de corte, la profundidad de pasada, el avance, la distancia entre pasadas y el empleo o no de refrigerante. En este apartado la mayoría de los programas ofrecen un campo en el fichero de herramientas para almacenar las condiciones de cada una trabajando en desbaste o en acabado. Algunos admiten una tabla de doble entrada por herramienta y material de la pieza que mecanizar, y ninguno tiene en cuenta la potencia de la máquina, el desgaste de la herramienta, la sujeción, ni determina las condiciones de régimen económico y régimen de máxima producción. Algún programa ofrece como dato una estimación de la potencia necesaria para cada operación.

1.7. Cálculo del recorrido de la herramienta

En el campo del cálculo del recorrido de la herramienta es donde se encuentran las grandes ventajas de estos sistemas y donde se hacen imprescindibles cuando hay que mecanizar superficies complejas con control de la inclinación relativa de la pieza y la herramienta.

A continuación se detallan cada una de las operaciones para las que se puede encontrar soluciones en los sistemas CAM.

1.7.1. Torneado

Los sistemas CAM para tornos trabajan presentando en la ventana gráfica la mitad de una sección de la pieza, por lo que no usan representación en tres dimensiones. La representación en dos dimensiones es suficiente excepto en la detección de posibles choques entre el portaherramientas y la pieza en el mecanizado de interiores, y evitar este problema es responsabilidad del usuario y no dispone de ninguna ayuda para detectarlo.

Perfilado

Los programas determinan el recorrido que debe seguir la herramienta para mecanizar el perfil (figura 3 y figura 4). Algunos paquetes permiten que a efectos del CAM se unan varias entidades (líneas, arcos, *splines*) para formar una sola entidad que es la que define el perfil, aunque a nivel de CAD sigan siendo entidades separadas.

Figura 3. Simulación, en el torno, del recorrido de la herramienta para realizar un perfilado interior

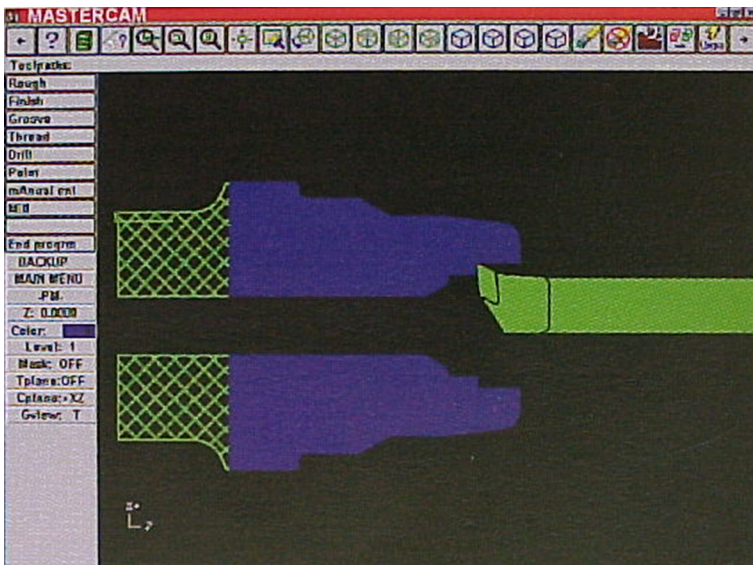
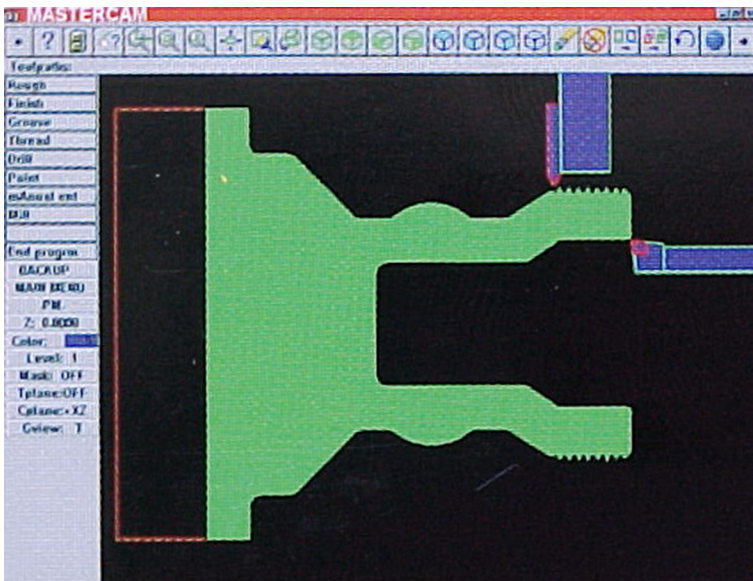


Figura 4. Simulación, en el torno, del recorrido de la herramienta en un perfilado interior y en un roscado exterior



Desbaste cilindrando o refrentando

Los sistemas que ofrecen esta posibilidad de alguna manera necesitan que se introduzca la forma de la pieza en bruto. Algunos exigen que esta forma sea rectangular (sección rectangular, es decir, pieza cilíndrica), otros permiten formas libres. El resultado de esta operación provocará, en la mayoría de los sistemas, que en el programa aparezcan las instrucciones de cada uno de los movimientos de la herramienta aunque la máquina disponga de ciclos que permitan programar el desbaste con una sola instrucción (figura 5 y figura 6).

Desbaste contorneando, muy adecuado para piezas de fundición o forja

Esta operación normalmente se realiza mediante sucesivas operaciones de perfilado, habiendo trazado previamente líneas paralelas al perfil final (figura 5 y figura 6). La mayoría de los sistemas ofrecen directamente el resultado sin necesidad de que el operador trace las líneas paralelas y dé las órdenes de perfilado una por una.

1.7.2. Torno con 2 torretas

En los sistemas CAM que contemplan este tipo de tornos, el operador empieza trabajando como si se tratase de un torno con una sola torreta, programando en ella todas las operaciones.

En una fase posterior dispone de dos diagramas de barras, uno para cada torreta, en los que cada barra representa una operación y su longitud es proporcional al tiempo que dura. El programa permite al operador trasladar operaciones de un diagrama a otro (de una torreta a otra) e introducir sincronismos entre torretas.

Durante la simulación, se representa en la pantalla la sección de la pieza completa utilizándose la mitad superior para simular los movimientos de una de las torretas y la mitad inferior los de la otra.

Figura 5. Simulación, en el torno, del recorrido de la herramienta en un desbaste interior cilindrando y en un desbaste exterior contorneando

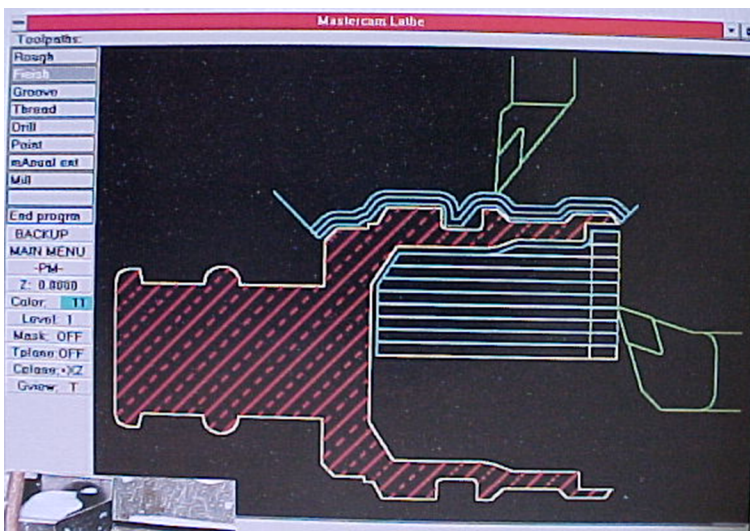
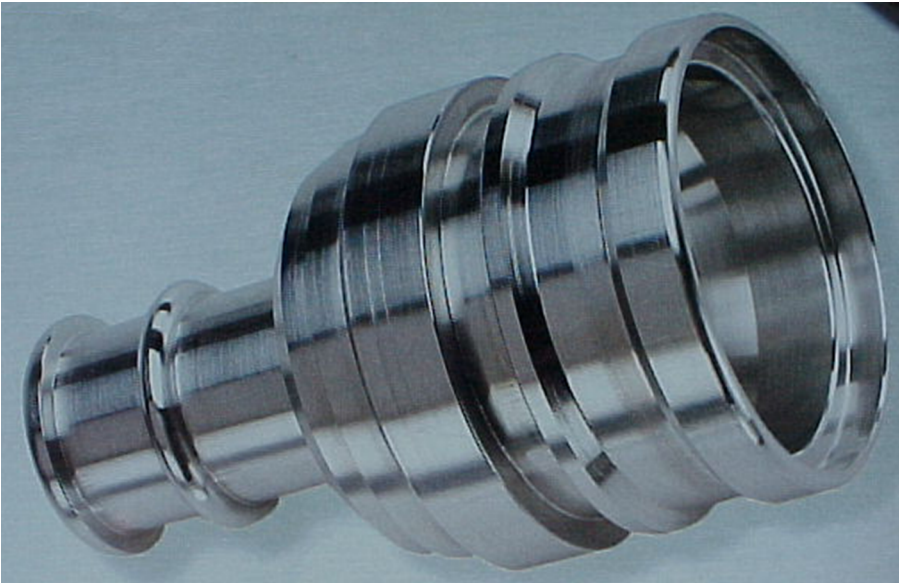


Figura 6. Pieza mecanizada, en un torno, a partir de los programas de control numérico generados en un sistema CAM



1.7.3. Tornos con torreta motorizada

Para abordar la programación de este tipo de operaciones, los sistemas CAM transforman el problema en uno de fresado con 2,5 ejes.

En las operaciones de mecanizado axial permiten desarrollar la superficie de la pieza con todos sus accidentes, transformándola en un rectángulo cuya altura es 360° y cuya anchura es la longitud de la pieza. El operador define las operaciones como en una fresadora y al posprocesar el programa los desplazamientos verticales se traducen en rotaciones del husillo principal del torno.

En las operaciones de mecanizado radial el operador trabaja igualmente como si se tratara de una fresadora trabajando sobre el perfil de la pieza y al posprocesar el programa se traducen los desplazamientos en la combinación de una traslación de la herramienta y una rotación de la pieza.

1.7.4. Operaciones punto a punto

Para todas estas operaciones algunos sistemas ofrecen métodos que reducen los desplazamientos en vacío entre operaciones, algunos se limitan a programar después de cada operación la más próxima de las restantes, y otros ofrecen la solución al problema del camino mínimo suponiendo que el desplazamiento entre operación y operación se realiza siempre sobre el mismo plano.

La forma de indicar la posición en que debe realizarse cada operación es siempre señalar puntos o arcos (en este caso se toma como punto el centro) que deben existir en el dibujo, nunca se comprueba que la operación realizada provoque en la pieza el resultado que se expresa en el dibujo, siendo responsabilidad del operador elegir correctamente la herramienta del diámetro adecuado.

Muchas máquinas poseen ciclos para realizar estas operaciones. Si se usa un sistema CAM, normalmente no se utilizarán estos ciclos y el programa contendrá todos los pasos necesarios para cada una de las operaciones.

Taladrado

La ayuda que ofrecen los sistemas CAM en esta operación consiste en que el operador puede elegir el ciclo de taladrado que se quiere y puede despreocuparse de la longitud de la punta de la herramienta encargándose el sistema de tenerla en cuenta en función del tipo de taladro (pasante o no) y del ángulo de la punta almacenado en el fichero de herramientas.

Taladrado profundo

El operador solo debe indicar la profundidad máxima posible en cada etapa; el sistema determina el número de etapas y la profundidad de cada una.

Roscado

El sistema utiliza la información del paso de rosca en el fichero de herramientas para sincronizar el avance en el eje Z y el movimiento de rotación de la herramienta, y además la salida se realiza en sentido contrario.

Chaflanado

Se utiliza la información del ángulo de la punta de la herramienta procedente del fichero de herramientas para determinar la profundidad que debe alcanzar la herramienta. El operador solo debe indicar la anchura o la profundidad del chaflán.

Mandrinado

En este tipo de operación el sistema, a petición del operador, puede hacer que después de penetrar la herramienta, se detenga orientada, se desplace de forma que deje de hacer contacto con la pieza y por último se extraiga sin cortar.

1.7.5. Operaciones con 2,5 ejes

En estas operaciones la herramienta trabaja a Z constante interpolando las trayectorias en los ejes X, Y. Cuando se varía Z, se mantienen los ejes X, Y parados.

Contorneado y ranurado

La herramienta sigue el camino definido por un contorno del dibujo, manteniéndose tangente a él en el contorneado, compensando el radio de herramienta a izquierdas o a derechas, o manteniéndose centrada en él en el ranurado.

Planeado

Para definir esta operación el operador señala un contorno cerrado y el sistema calcula el recorrido de la herramienta tal que realizando trayectorias según las distintas estrategias de movimiento, barra la superficie a planear. Por defecto, normalmente la distancia entre pasadas es igual al 0,75 % del diámetro de la herramienta aunque el operador puede señalar otra cosa.

Cajeras

Aquí se trata de barrer la superficie contenida en un contorno cerrado respetándolo. Las estrategias que habitualmente facilitan los distintos sistemas para realizar el barrido son: zig-zag, unidireccional, espiral y paralelo al contorno. Normalmente puede suministrarse el punto de inicio de la trayectoria para que pueda programarse un taladro previo.

La mayoría de los sistemas admiten la existencia de islas (contornos cerrados contenidos en el interior de la cajera que definen zonas que no hay que mecanizar). Las islas pueden sortearse, o bien retrayendo la herramienta al alcanzarlas, o bien contorneándolas.

Desbaste de contornos

Esta operación es derivada del contorneado y podría realizarse siempre contorneando repetidamente un haz de curvas paralelas a la que define la superficie final, pero algunos sistemas ofrecen la posibilidad de realizarlo automáticamente indicando la profundidad de pasada y el número de pasadas.

Cajeras de contorno inclinado

Consiste en mecanizar sucesivamente un conjunto de cajeras definidas por curvas paralelas a la inicial pero a profundidades crecientes a medida que se aleja de la curva inicial. Siempre es posible utilizar las herramientas que ofrece el CAD para definir cada una de las cajeras y posteriormente se mecanizaría una a una desde el CAM, pero algunos sistemas ofrecen la posibilidad de realizar la operación automáticamente indicando el número de pasadas, la profundidad de cada pasada y el ángulo de inclinación de los bordes.

Desbaste de superficies complejas por capas

Normalmente esta operación se encuentra en los módulos de tres ejes de los paquetes de CAM aunque la operación en sí es propia del trabajo en 2,5 ejes. Ello se debe a que se considera que para poder hacer el acabado es necesario el módulo de tres ejes y no tiene sentido poder hacer el desbaste si posteriormente no puede hacerse el acabado.

Esta operación también puede hacerse manualmente en cualquier caso. Los pasos que deberíamos seguir consistirían en:

- Trazar un conjunto de planos paralelos entre sí y perpendiculares al eje Z, que son los que definirán cada capa del desbaste.
- Hallar los contornos de la intersección entre los planos y la pieza en bruto y la pieza acabada.
- Mecanizar las cajas halladas con la operación anterior utilizando una herramienta plana.

Al igual que en casos anteriores, existen paquetes CAM que ofrecen una función que automatiza todo el proceso reduciendo al mínimo la intervención del operador.

1.7.6. Operaciones con 3 ejes

Estas operaciones se refieren a aquellos casos en los que mientras la herramienta está cortando se producen movimientos sincronizados en los tres ejes del espacio.

Superficies complejas

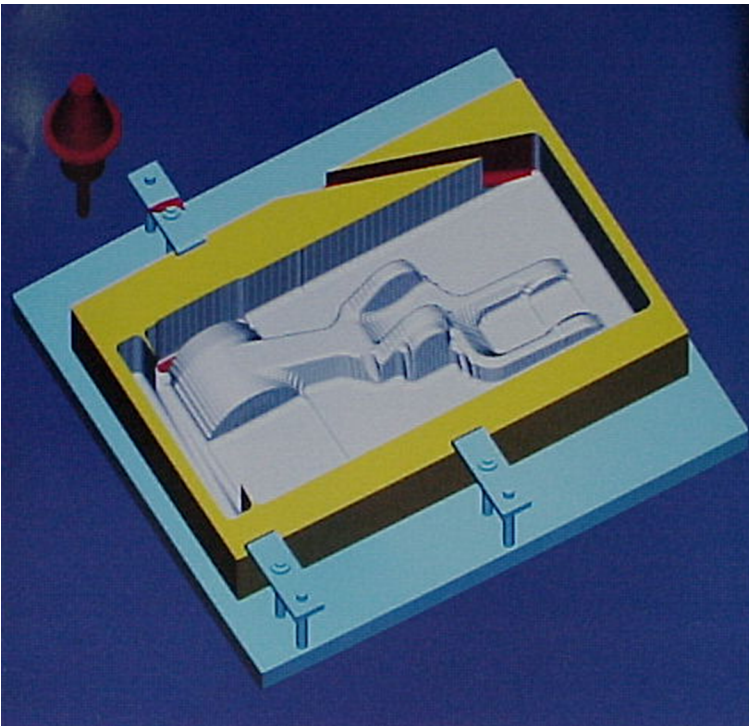
Para mecanizar superficies complejas (figura 7 y figura 8), no siempre es necesario que la herramienta se mueva en los tres ejes del espacio (curvas de nivel..., en general si se mecaniza siguiendo un conjunto de curvas obtenido intersectando un conjunto de planos paralelos y la superficie), aunque en el caso general sí se requiere el movimiento simultáneo, y en los paquetes de CAM siempre se encontrará esta operación en los módulos de tres ejes.

Existen en el mercado paquetes que determinan una estrategia tal que la calidad de la superficie mecanizada se mantiene constante, es decir, los distintos trazos descritos por la herramienta se hallan más próximos donde la inclinación de la superficie es mayor y más separados donde la inclinación es menor, y de esta manera se consigue una calidad constante del acabado superficial del mecanizado.

Figura 7. Simulación de las trayectorias de la herramienta en la mecanización de una superficie compleja



Figura 8. Simulación del mecanizado de una superficie compleja



Hay paquetes comerciales que ofrecen otras alternativas para determinar la estrategia de mecanizado de la superficie:

- Siguiendo las curvas isoparamétricas de la superficie es la estrategia más rápida de cálculo para el programa porque la representación interna de las superficies es en modo paramétrico y determinar las curvas isoparamétricas es inmediato. Pero presenta numerosos inconvenientes: en general, no pueden mecanizarse varias superficies simultáneamente; si la superficie presenta solapamientos, el camino obtenido es incorrecto (la herramienta se “come” la superficie); y el control del operador es mínimo. La forma de

las curvas isoparamétricas depende de la forma en que se ha dibujado la superficie, no de la superficie en sí (una misma superficie puede presentar distintos conjuntos de curvas isoparamétricas dependiendo del método seguido para dibujarla).

- Por planos paralelos obtenidos de la intersección con la pieza de un conjunto de planos paralelos entre sí y paralelos al eje Z.
- Trazos obtenidos mediante la proyección de un haz de curvas sobre la superficie de la pieza.

Al mecanizar superficies complejas pueden aparecer zonas que por poseer un radio de curvatura inferior al de la herramienta queden sin mecanizar (en el método de curvas isoparamétricas el resultado es un mecanizado incorrecto). Para detectar estas zonas y permitir una operación posterior que las mecanice, los paquetes CAM ofrecen distintas alternativas:

- Algunos sistemas se apoyan en el CAD que permite hallar líneas de isocurvatura de las superficies para que el operador pueda hallar las zonas no mecanizadas.
- Otros generan las curvas que delimitan las áreas que no se han mecanizado.
- Otros, en cambio, aíslan directamente las partes de superficies que no se han mecanizado.
- Y otros, partiendo de la información del diámetro de la herramienta utilizada y del diámetro, más pequeño, de la herramienta que se quiere utilizar, automáticamente mecanizan las zonas que la primera herramienta no ha podido mecanizar.

Intersección de superficies o bitangencias

Este problema es puramente de trabajo en 3 ejes y consiste en hallar la trayectoria de la herramienta para que la bola de la punta se mantenga permanentemente tangente a las dos superficies cuya intersección se desea mecanizar. Un ejemplo típico de ello es el mecanizado de los radios de acuerdo en los moldes de inyección.

1.7.7. Operaciones con 4 y 5 ejes

En estas operaciones, además de la posición puede controlarse la orientación relativa entre la pieza y la herramienta de forma total (5 ejes) o parcial (4 ejes). Las operaciones son similares a las de 3 ejes pero el operador puede obtener este control adicional que puede ejercer normalmente solicitando que la herramienta se mantenga perpendicular a la superficie a fin de mejorar el acabado, aunque también puede indicar una inclinación con un ángulo fijo, o con un ángulo de entrada y otro de salida para cada pasada y la inclinación a lo largo de la pasada se obtendrá por interpolación, o que la distancia entre las partes alejadas de la herramienta y la superficie de la pieza sea máxima.

1.7.8. Programación del recorrido de la herramienta en máquinas con alta velocidad

En el caso de querer programar mecanizados a alta velocidad, los cuales implican elevadas velocidades de desplazamiento de las herramientas, en los cambios de dirección se producen grandes aceleraciones y desaceleraciones que dificultan a la herramienta seguir fielmente la trayectoria programada, debido a las inercias que entran en juego. Para evitarlo, es necesario que el sistema CAM introduzca bucles de enlace con curvaturas suaves en los cambios de dirección. No todos los sistemas CAM tienen esta posibilidad.

1.8. Traducción del programa al lenguaje del control

Este es el último paso en la obtención de un programa de control numérico mediante un sistema CAM. Existen tres estrategias en la obtención de este objetivo: obtención directa, obtención en formato ISO estándar y obtención en APL o CLDATA.

La obtención directa se consigue en programas que permiten configurar por parte del usuario la traducción de la información de definición del proceso de mecanizado a instrucciones de control numérico. Es muy dependiente de la máquina y de su control numérico computerizado, al tiempo que requiere un trabajo previo del usuario, pero después es práctica si no se tienen muchas máquinas y controles distintos.

La obtención en formato ISO estándar es una posibilidad que ofrecen algunos programas. Posteriormente hay que desarrollar traductores y posprocesadores para adaptarlo al formato de cada control numérico.

La obtención en formato APL o CLDATA produce un paso intermedio antes de la obtención del programa para la máquina y su control numérico computerizado. La idea consiste en obtener un programa universal, independiente de la máquina y *a posteriori* con la intervención de un posprocesador individualizarlo para la máquina concreta en la que haya de ejecutarse en cada ocasión. Esta estrategia, si los posprocesadores son suficientemente completos, permite aprovechar los ciclos de máquina.

Existen en el mercado generadores universales de posprocesadores, con lo que teóricamente la problemática de crear posprocesadores para cada máquina de una empresa queda en manos del usuario; no obstante, es un proceso tedioso y en general no son tan universales como se pretende, ya que existen casos particulares en los que no pueden adaptarse completamente. Actualmente los propios suministradores de los sistemas CAM pueden suministrar también posprocesadores específicos para cada tipo de control numérico computerizado y máquina.

1.9. Tendencias futuras

Los artículos en revistas y los proyectos de investigación sugieren que las tendencias futuras en el desarrollo de los sistemas CAM se dirigen hacia la mejora de aquellos aspectos en los que los sistemas actuales ofrecen prestaciones más pobres, es decir, en la determinación de las condiciones tecnológicas así como en mejorar la información ofrecida del proceso de fabricación.

En cuanto a este último aspecto, las tendencias apuntan hacia la obtención de documentación adicional al programa de control numérico, con indicación de la configuración de las torretas o almacenes automáticos de herramientas que el programa espera encontrar en la máquina, documentación acerca del modo de fijación de la pieza en la máquina y documentación gráfica de la pieza en bruto y de la pieza acabada en cada fase.

Respecto a las condiciones tecnológicas, los próximos desarrollos se dirigen hacia un apoyo en la determinación científica de las condiciones de corte óptimas y hacia la ayuda en la selección del orden de operaciones y herramientas a partir de diseños en CAD por características.

