

# Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



## “Proyecto de Automatización con Control Numérico Computarizado de una Fresadora Vertical Convencional ”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**CESAR ALBERTO PACHECO BELEVAN**

PROMOCION: 1990 - 2

**LIMA . PERU . 1993**

## CONTENIDO

PROLOGO.....	6
CAPITULO 1	
INTRODUCCION.....	9
CAPITULO 2	
CONSIDERACIONES GENERALES.....	12
2.1 Máquinas fresadoras.....	12
2.2 Control numérico computarizado.....	15
2.3 Tecnologías usadas en máquinas herramientas con control numérico.....	18
2.3.1 Posicionamiento de la herramienta.....	19
2.3.2 Captadores de posición.....	21
2.3.3 Sistema de desplazamiento de la mesa y guías...	24
2.3.4 Sistema de ejes.....	26
2.3.5 Cambio de herramienta.....	29
2.3.6 Medición de piezas y herramientas.....	31
2.3.7 Control de las condiciones técnicas del mecanizado.....	32
2.4 Proceso de programación de una máquina herramienta con control numérico.....	33
2.5 Códigos del lenguaje de control numérico utilizado en máquinas herramientas.....	36
2.6 Programación del control numérico.....	39
2.6.1 Numeración del bloque N.....	40
2.6.2 Programación de las funciones preparatorias G..	40
2.6.3 Programación de la velocidad de avance F.....	48
2.6.4 Programación de velocidad de giro del cabezal..	48
2.6.5 Programación de funciones auxiliares M.....	48
2.6.6 Programación de la herramienta T.....	49
2.7 Dispositivos de accionamiento.....	49
2.7.1 Motores de paso.....	49
2.7.1.1 Tipos de motores de paso.....	50
2.7.1.2 Características de diseño de motores de paso.....	54
2.7.2 Motores de corriente continua.....	59
2.7.2.1 Principio de funcionamiento.....	60
2.7.2.2 Control de velocidad.....	64

### CAPITULO 3

TRANSMISIONES MECANICAS DE LA FRESADORA VERTICAL.....	66
3.1 Consideraciones para el diseño de las transmisiones.....	66
3.1.1 Definiciones de parámetros utilizados en el fresado.....	67
3.1.2 Materiales a trabajar.....	70
3.1.3 Herramientas a utilizar.....	71
3.1.4 Fuerzas de corte.....	72
3.1.4.1 Cálculo de la fuerza de corte Ft.....	73
3.1.4.2 Cálculo de la fuerza radial Fr.....	74
3.1.5 Cálculo del espesor medio de la viruta (hm)....	74
3.2 Cálculo de la potencia del husillo.....	76
3.3 Diseño de la transmisión del carro transversal.....	77
3.3.1 Cálculo teórico del torque del carro transversal.....	78
3.3.2 Cálculo experimental del torque.....	80
3.3.3 Selección de la faja.....	81
3.4 Diseño de la transmisión longitudinal.....	85
3.4.1 Cálculo teórico del torque del carro longitudinal.....	85
3.4.2 Cálculo experimental del torque.....	87
3.4.3 Selección de la faja.....	87
3.5 Diseño de la transmisión vertical.....	91
3.5.1 Cálculo teórico del torque del carro vertical..	91
3.5.2 Cálculo experimental del torque.....	92
3.5.3 Selección de la faja.....	93

### CAPITULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	97
4.1 Circuito de direccionamiento E/S de datos.....	98
4.1.1 Tarjeta decodificadora.....	98
4.1.2 Circuito de memorias.....	99
4.2 Circuito de clock variable.....	101
4.3 Control de los motores de paso.....	104
4.3.1 Circuito secuenciador.....	104
4.3.2 Contador/temporizador programable.....	106
4.3.3 Circuito amplificador de potencia de los motores de paso.....	109
4.3.4 Fin de desplazamiento de los carros.....	111
4.4 Circuito de los limit switch.....	112
4.5 Control proporcional de velocidad.....	112
4.6 Cálculo de la fuente de potencia.....	116

### CAPITULO 5

SISTEMA DE PROGRAMAS.....	117
5.1 Módulo CAD.....	118
5.2 Módulo CAM.....	119
5.2.1 Editor de órdenes de control numérico.....	119
5.2.2 Simulación de la trayectoria de la herramienta.....	121

5.3 Módulo de ejecución del proceso de mecanizado.....124  
5.3.1 Rutinas del programa principal.....126  
5.3.2 Rutinas de la unidad PORTS.....134

CAPITULO 6

**ANALISIS ECONOMICO.....137**  
6.1 Análisis económico de una fresadora vertical  
convencional.....137  
6.1.1 Costo horario de operación de la máquina.....138  
6.1.2 Costo del material.....140  
6.1.3 Tiempo de ejecución de una pieza.....141  
6.1.4 Costo de la herramienta.....143  
6.2 Análisis económico de una fresadora vertical  
automatizada.....148  
6.2.1 Costo horario de operación de la máquina.....150  
6.2.2 Costo del material.....152  
6.2.3 Tiempo de ejecución de una pieza.....152  
6.2.4 Costo de la herramienta.....153  
6.3 Análisis económico de una fresadora vertical  
C.N.C.....157  
6.3.1 Costo horario de operación de la máquina.....157  
6.3.2 Costo del material.....158  
6.3.3 Tiempo de ejecución de una pieza.....158  
6.3.4 Costo de la herramienta.....160  
6.4 Costo total de producción.....163

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....167**

**BIBLIOGRAFIA.....170**

APENDICE A

**PLANOS MECANICOS**

APENDICE B

**DIAGRAMAS DE CIRCUITOS ELECTRONICOS**

APENDICE C

**CATALOGO DE SELECCION DE FAJAS GATES**

APENDICE D

**CATALOGO DE FRESADO SANDVIK**

## PROLOGO

Debido a que este trabajo involucra el estudio de diversos campos técnicos, se ha separado la parte de mecánica, electrónica y software en distintos capítulos.

El capítulo 2 se refiere a aspectos generales respecto a tecnologías que frecuentemente se usan en máquinas con control numérico, el lenguaje de C.N. y dispositivos de accionamiento en donde se detallan las características y control de los motores de corriente continua y de los motores de paso. Estos últimos son adecuados para conseguir posicionamientos precisos.

En el capítulo 3 se trata sobre el diseño de la transmisiones mecánicas en donde se hace un análisis de las cargas que actúan sobre cada uno de los carros vertical, longitudinal y transversal de la fresadora vertical. El análisis se hace en forma teórica y experimental y se quiere hallar el torque necesario para mover dichos carros. Con esto podemos seleccionar los motores de paso adecuados. Asimismo, se hace la selección de fajas dentadas y las poleas para la transmisión de potencia desde el motor de paso hacia el tornillo de cada carro. Por otro lado, se hace el cálculo de la potencia de corte para hallar la

potencia necesaria del motor de corriente continua que hará girar al husillo, y por ende, a la herramienta (fresa).

El diseño del sistema de control se describe en el capítulo 4. En él se describe la forma de direccionamiento utilizado para la comunicación entre el computador y los circuitos de control; se explicarán los circuitos secuenciadores y amplificadores para controlar los motores de paso; veremos como se detectan los <sup>a</sup>señales provenientes de los sensores de fin de carrera, con el propósito de evitar que los carros colisionen o se salgan de sus guías en caso de algún error inesperado. Por último, se calculará la fuente de potencia necesaria para alimentar a los circuitos de control y a los dispositivos de accionamiento.

El capítulo 5 corresponde al sistema de programas para la simulación y ejecución de las órdenes de control numérico. Veremos en primer término el editor de dibujos que hace uso de menús personalizados dentro del entorno AutoCAD. Este editor nos permitirá dibujar la pieza en bruto y la pieza final para después poder compararla con la simulación de las órdenes de C.N. La simulación comprende el editor de órdenes de control numérico, en donde programaremos los bloques del proceso de mecanizado, y el programa simulador propiamente dicho que fue desarrollado en el lenguaje AutoLISP, siendo éste un lenguaje propio del paquete AutoCAD. Por último se desarrolló el programa que permitirá ejecutar las órdenes de C.N.C. en la fresadora vertical.

El último capítulo trata sobre el análisis económico

comparativo entre una máquina herramienta convencional, una automatizada y una máquina con CNC incorporado. En ella trataremos de analizar cuándo resulta conveniente automatizar una máquina herramienta convencional.

Agradezco al Ingeniero Rolando Portugal por haber dado su valioso tiempo en la revisión y asesoramiento de este trabajo. El instituto tecnológico superior TECSUP me prestó su colaboración otorgándome las facilidades para la construcción del prototipo. Asimismo, agradezco a los ingenieros Daniel Carbonel y Juan Musayón, y muy especialmente a los profesores Mauricio Gálvez y Carlos Córdova quienes, desde un inicio, mostraron un gran interés en el desarrollo de este proyecto.

Deseo agradecer de manera especial a mi amigo y colega Marvin Delgado con quien trabajé en el desarrollo de esta investigación, ya que sin su ayuda me hubiera sido difícil culminar este proyecto.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

Las máquinas herramientas han sido objeto de un constante desarrollo en el que se intenta conseguir máquinas más eficientes para reducir los tiempos de mecanizado, reducir los costos de mano de obra y mejorar la calidad de los productos.

Así se ha llegado a las máquinas herramientas con control numérico computarizado, las cuales trabajan en forma automática y permiten mecanizar una mayor cantidad de piezas, de mayor calidad y complejidad.

Sin embargo, el inconveniente de estas máquinas es su elevado costo, y en un país como el nuestro se hace muy difícil poder adquirir una de estas máquinas.

Es por esto que en el presente proyecto se propone como alternativa la automatización de una máquina herramienta convencional con C.N.C. En este caso se optó por automatizar una fresadora vertical de pequeñas dimensiones.

La automatización comprende varias etapas. Se desarrollarán programas en la computadora que permitirán editar las órdenes de control numérico y también podrá hacerse la simulación gráfica de los desplazamientos de la

pieza con respecto a la herramienta. Por otro lado, se programó a la computadora para que las órdenes de C.N. puedan ser enviadas en forma de señales digitales al control de la máquina a través de una interfase. Los programas se desarrollaron en Pascal, el cual es un lenguaje estructurado de alto nivel.

Con respecto al control de la máquina, se diseñarán los circuitos electrónicos que permitirán controlar a los motores de paso. Estos motores necesitan de una secuencia de energización de sus bobinas para lograr girar, y se requiere estudiar y experimentar con ellos para lograr un funcionamiento adecuado, así como para lograr el giro de tres motores simultáneamente.

Otro de los dispositivos de accionamiento a controlar será el motor de corriente continua que hará girar al husillo. Mediante el diseño de un control de velocidad proporcional se logrará no solo fijar el número de revoluciones del motor sino que, a su vez, se tratará en lo posible de mantener dicha velocidad, aún cuando existan variaciones de carga.

Además, se tuvo que diseñar las transmisiones mecánicas mediante fajas dentadas que transmitirán el giro de los motores de paso al tornillo de cada carro.

Debido a los distintos campos que intervienen en este trabajo, se desarrolló en forma paralela el sistema de programas, el sistema de control (circuitos electrónicos), y el sistema mecánico. Al final se integraron estos tres sistemas para obtener la fresadora vertical automatizada

con C.N.C.

Se efectuará un análisis económico para comparar el costo de manufactura de un lote de piezas en una fresadora vertical convencional, una automatizada y una máquina con C.N.C. incorporado, lo cual servirá para definir en que casos resulta rentable automatizar una máquina herramienta convencional.

## CAPITULO 2

### CONSIDERACIONES GENERALES

Para poder automatizar una fresadora vertical con control numérico computarizado (C.N.C), debemos empezar conociendo las características de las fresadoras, estudiar lo que es el control numérico computarizado y las tecnologías que se aplican a las máquinas herramientas con C.N.C. Con respecto a este último punto trataremos sobre los dispositivos de accionamiento de las máquinas herramientas, principalmente sobre los motores de paso.

#### 2.1 Máquinas Fresadoras

Las fresadoras son máquinas muy versátiles en operaciones de mecanizado. Esta clase de máquinas utiliza un proceso de corte en la cual se hace uso de una herramienta giratoria de múltiples filos.

Con las fresadoras es posible proveer a la pieza de superficies planas o curvas, de ranurados, de dentados, etc. El rendimiento de arranque de viruta del material es elevado y pueden obtenerse buenos acabados superficiales.

El corte por cada diente se realiza en forma intermitente permitiendo de este modo enfriarla. La

herramienta de corte se sujeta al portaherramienta en donde puede preajustarse a una longitud específica y fijarlo mediante el anillo de sujeción. El portaherramienta a su vez, se sujeta al husillo y ambos tienen una conicidad con el fin de que se suelten solos. Generalmente éstos se fijan entre sí mediante un vástago (tirante) roscado.

En la mayoría de las fresadoras, el cuerpo de la fresadora soporta el husillo, los accionamiento principal y de avance, la mesa de consola móvil con carro transversal y mesa de fresado, y el brazo deslizante que suele ir apoyado en un soporte.

El accionamiento principal da al husillo la velocidad de corte y ésta puede ser graduada en forma limitada al valor apropiado.

Los mecanismos de accionamiento de avance permiten desplazar la consola y por tanto la mesa de fresar con la pieza según los 3 ejes, es decir, longitudinal, transversal y verticalmente. Para esto se utilizan husillos roscados accionados por una manivela.

La clasificación de las fresadoras se basa en el diseño, operación o propósito de la misma. Entre ellos tenemos:

**Fresadoras Horizontales** en las que el husillo de fresar está dispuesto horizontalmente. Estas máquinas usan los mecanismos de giro del husillo y de los accionamientos de avance previamente mencionados.

**Fresadoras Verticales.** En este tipo de fresadoras el husillo se encuentra en forma vertical. Estas permiten realizar trabajos de fresado frontal principalmente.

Los accionamientos principales y de avance son similares a los de la fresadora horizontal.

**Fresadoras de Bancada Fija** tiene el husillo montado en un cabezal normalmente con guías de milano para deslizarse sobre la cara de la columna. La mesa de fresar descansa sobre la bancada permitiendo solamente movimientos longitudinal y transversal. El desplazamiento vertical lo da el cabezal.

**Máquinas de Fresar Universales.** La característica principal de esta fresadora es la de que la mesa de fresar es giratoria y permite, entre otras cosas, el fresado de ranuras en espiral.

La fresadora es la primera máquina herramienta a la cual se le aplicó el control numérico. Esto se realizó en el año 1947 en los Estados Unidos por necesidad de construir piezas para la Industria Aeronáutica. Estas piezas complejas necesitaban de máquinas capaces de conseguir en forma razonablemente económica la fabricación de la pieza, las cuales en máquinas tradicionales resultaban muy costosas o imposibles de realizar. Se necesitaba de una máquina capaz de coordinar movimientos simultáneamente al momento de ejecutar el mecanizado de la pieza y, por consiguiente, producir piezas tridimensionales de formas complejas, precisas y variadas.

En 1953, el M.I.T (Massachusetts Institute of Technology), elaboró un sistema de comando capaz de controlar una fresadora con tres ejes, realizar movimientos totalmente independientes y poder seguir una trayectoria definida sin la intervención del operador.

Actualmente, se pueden encontrar máquinas con cinco ejes controlados simultáneamente: tres ejes lineales y dos rotativos. Generalmente se fabrican con husillos verticales y se equipan con una y a veces dos mesas giratorias.

## 2.2 Control Numérico Computarizado

El Control Numérico Computarizado es un dispositivo capaz de dirigir el posicionamiento y las velocidades de los órganos móviles de las máquinas herramientas de forma totalmente automática a partir de instrucciones definidas por medio de un programa.

Desde el punto de vista de la productividad, el hecho más relevante es que los sistemas CNC permiten unos mayores coeficientes de utilización de las máquinas.

Consta de una unidad de gobierno que está compuesto esencialmente por un teclado, monitor, interruptores, lámparas testigo, etc. Permite la entrada de datos, la edición del programa y la comunicación a la máquina para su ejecución. Los datos de un programa pueden almacenarse en discos flexibles

o cintas magnéticas.

Luego de cargar el programa a memoria, la máquina leerá secuencialmente los bloques del programa y realizará cálculos para definir la posición y trayectoria a seguir por la herramienta. El control envía entonces las señales a los dispositivos de movimiento para su ejecución.

Para lograr un posicionamiento de la herramienta con estos controles debe existir una sincronización perfecta en el movimiento de todos los ejes para ejecutar la trayectoria deseada. Esto implica mantener durante el mecanizado la velocidad de avance programada. Para ello los controladores incorporan procedimientos de interpolación. Los más utilizados son:

Interpolación lineal

Interpolación circular.

En la primera el controlador mueve la herramienta en dirección recta entre dos puntos, y en cada eje la velocidad se calcula de forma que la relación de los mismos sea la pendiente de la recta.

En la interpolación circular, el control mueve la herramienta sobre un arco de círculo mediante impulsos cuya frecuencia sigue en cada eje la ley del seno y coseno respectivamente.

El C.N.C. dispone de procedimientos de prueba para verificar el correcto funcionamiento tanto de la máquina como del control.

También permite monitorear visualmente no sólo el estado del programa sino también el de la máquina y el control.

Por otro lado, la capacidad de cálculo y de memoria de los C.N.C. permite el uso de técnicas de programación más eficientes y sencillas. Entre estas destacamos:

Saltos de programa condicionales e incondicionales.

Rutinas programadas por el usuario.

Potenciación de ciclos fijos suministrados por el fabricante.

Programación paramétrica para fabricación de piezas similares.

Empleo de funciones preparatorias potentes, especialmente para cálculo de la trayectoria de la herramienta, teniendo en cuenta desplazamientos y compensaciones de la misma.

La edición de programas, que permite al pie de la máquina, corregir y modificar el programa.

Representación gráfica del perfil de la pieza y verificación de la trayectoria de la herramienta.

Posibilidad de disponer una tabla de herramientas en base a la cual se modificarán las trayectorias.

En resumen, las máquinas de control numérico computarizado controlan totalmente el funcionamiento de la máquina herramienta y es controlado electrónicamente por la unidad de gobierno. Brindan

una gran ventaja que es la de poder sustituir los programas almacenados, permitiendo un rápido empleo de la misma máquina en la elaboración de distintas piezas. Hace simple el proceso de programación, preparación y elaboración de la pieza.

Debe mencionarse también el Control Numérico Directo (DNC), que es uno de los niveles más altos de integración y automatización de un sistema que une un grupo de máquinas. Con este tipo de sistema es posible la comunicación directa entre las máquinas con CNC, así como la distribución respectiva de los programas. Los beneficios que brinda el DNC son:

Realización de programas de elaboración a través de programación automática.

Prueba y puesta a punto de programas de mecanizado, así como su actualización y archivo.

Colección y elaboración de datos relativos a los dispositivos y herramientas existentes.

Colección y elaboración de datos de manejo de la máquina para la actualización de los datos técnicos, de los estándares y de las especificaciones del mecanizado.

### 2.3 Tecnologías usadas en Máquinas Herramientas con Control Numérico

Entre las tecnologías comúnmente aplicadas en máquinas herramientas con C.N.C. tenemos las siguientes:

Posicionamiento de Herramienta  
Captadores de Posición  
Sistema de Desplazamiento de Mesa y Guías  
Sistema de Ejes  
Cambio de Herramienta  
Medición de Piezas y Herramientas  
Control de Condiciones de Mecanizado

### 2.3.1 Posicionado de la herramienta

El principal problema a resolver dentro de las máquinas herramientas con C.N. es transmitir a la pieza (caso fresadora) o a la herramienta (torno) un desplazamiento a distintas velocidades y hacerlo en forma independiente en cada eje.

Para esto se han desarrollado tecnologías que permiten realizar los desplazamientos de la pieza o herramienta en forma controlada y precisa proveyendo a las máquinas herramientas de un motor y un reductor en cada eje.

Básicamente, se utilizan cuatro tipos de accionadores para los ejes:

Motor paso a paso el cual debe ser controlado electrónicamente y su velocidad se regula actuando sobre la frecuencia.

Motor de corriente continua, que son regulados variando la tensión de alimentación para controlar su velocidad.

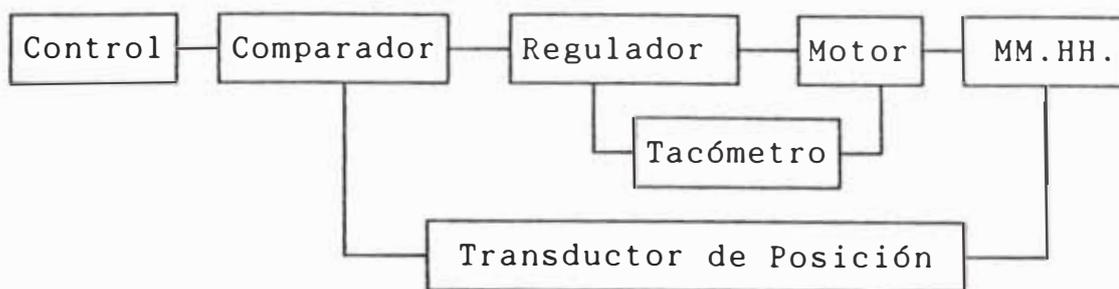
Motor asíncrono de corriente en los cuales se actúa sobre la frecuencia y la tensión para controlarlo.

Motor Hidráulico, al cual se le debe controlar el caudal para poder regular la velocidad de desplazamiento y evitar saltos o cortes.

Sobre los dos primeros motores se dará una explicación detallada de sus funcionamiento y control en el siguiente capítulo.

Existen dos sistemas de control para posicionar la herramienta o la pieza a la posición programada; éstos son el sistema de bucle cerrado y el sistema de bucle abierto.

En el sistema de bucle cerrado, existe un continuo control sobre la posición actual de la herramienta, utilizando para ellos captadores de posición. Este valor actual de la herramienta es comparada con la posición programada a la que se desea llegar y se detendrá solo cuando ambas coincidan. Normalmente, esto va acompañado de un bucle de control sobre la velocidad con que se ejecuta el desplazamiento, de tal modo que se puedan efectuar aceleraciones y desaceleraciones para lograr una mayor precisión en el posicionado y también mayor rapidez.



En el sistema de bucle abierto, el posicionamiento no es controlado. Se programa la posición que se desea alcanzar y esta información se envía al accionador, el cual, ejecutará el desplazamiento pero no devolverá información sobre su posición real. Bajo este sistema funcionan los motores paso a paso. El desplazamiento que generan estos motores queda determinada por dos parámetros: el número de impulsos, que indican el ángulo que debe girar el motor, y la frecuencia de los pulsos que definen la velocidad de giro del motor. El inconveniente de este sistema es que si el motor pierde pasos durante el giro, se genera un error en el posicionamiento de la herramienta o pieza y no hay forma de detectarlo.



### 2.3.2 Captadores de Posición

Se mencionó que los sistemas de posicionamiento de bucle cerrado debían hacer uso de captadores de posición para conocer en forma precisa la

posición de la pieza respecto a la herramienta en cada uno de sus ejes.

Esta función la desarrollan los captadores de posición que miden una magnitud geométrica ya sea lineal o angular y la envían al control que se encarga de decodificarla, analizarla y actuar en forma adecuada.

Los captadores de posición los podemos clasificar en los siguientes grupos.

Por tipo de medida: Absolutos e incrementales.

Los captadores absolutos devuelven un valor para cada posición de la pieza a lo largo del eje, y que está referido a un origen fijo u origen de coordenadas.

Los captadores incrementales o relativos dan una magnitud del desplazamiento que está referida a la posición anterior. Para cada desplazamiento elemental emite un impulso y la longitud total recorrida será proporcional al número de impulsos emitida.

Por el tipo de señal : Digital y analógico

El captador digital pueden dar como señal de salida un número finito de valores de posición.

El captador analógico permite obtener en forma continua los valores de posición obtenida a partir de una variación magnética, eléctrica u otra que se transforma en señal de salida.

Por el tipo de desplazamiento : Lineales o rotativos.

Los captadores lineales miden desplazamientos lineales, como lo puede ser el desplazamiento de uno de los ejes de una fresadora. Los captadores rotativos miden magnitudes angulares o movimientos de rotación.

Dentro de los más usados tenemos los captadores digitales incrementales, los cuales se basan en reglas o discos graduados. Cada desplazamiento elemental genera un impulso eléctrico que se envía al control para su procesamiento. Son muy utilizados por su sencillez y bajo costo.

Existen captadores analógicos absolutos que se basan en el principio de la variación de las corrientes inducidas según el desplazamiento de unas bobinas. Así tenemos el resolver rotativo en que el desplazamiento es angular y por tanto tiene el aspecto de motores eléctricos. Están constituidos por dos bobinas fijas (estator) dispuestas a 90 grados y por una bobina giratoria. Las bobinas fijas son alimentadas con tensión alterna y de acuerdo a la posición relativa entre ellas con el rotor se genera una tensión en los bornes de este último que es proporcional al ángulo girado.

El inductosyn lineal tiene un funcionamiento similar al resolver excepto que el rotor se reemplaza por una regla fija bobinada, y serán los estatores los que se desplazarán por encima de la regla.

Ambos están basados en el principio de la variación de las corrientes inducidas según el desplazamiento de unas bobinas o espiras.

Las características de los captadores en cuanto a precisión, sensibilidad, resolución, repetibilidad, ruidos e interferencias son fundamentales por cuanto condicionan directamente la precisión obtenida en el mecanizado.

### 2.3.3 Sistema de Desplazamiento de la Mesa y Guías

#### *Sistema de Desplazamiento de la Mesa*

Es importante en la máquina herramienta eliminar las holguras que existen al invertir el sentido del desplazamiento de los carros.

Para lograr esto se dispone principalmente de un sistema de tornillo de bolas que elimina las holguras entre los elementos en movimiento.

En este sistema, las roscas del tornillo y de la tuerca son reemplazadas por gargantas helicoidales por los cuales circulan bolas de acero. Tiene un dispositivo que permite ajustar el tensado entre las gargantas y las bolas que

aseguran la eliminación de las holguras. Este sistema permite una disminución de fricciones, aumento de velocidad de traslación, y una mayor durabilidad.

### **Guías**

Es deseable en máquinas C.N. que el desplazamiento de la pieza o herramienta siga un eje lineal, sin dispersiones geométricas y con pocas fricciones. En las máquinas tradicionales se usan colas de milano, guías prismáticas y circulares. Estos mismos tipos de guías se usan en máquinas C.N. pero se observan reacciones importantes en el arranque, y a velocidades lentas se produce fenómenos de ramoneo (avance por sacudidas).

Para evitar esto se interponen entre los elementos en movimiento patines de agujas, camino de bolas, turcitas (aleación de teflón y bronce) , o una película de aceite "irrompible" (guía hidrostática).

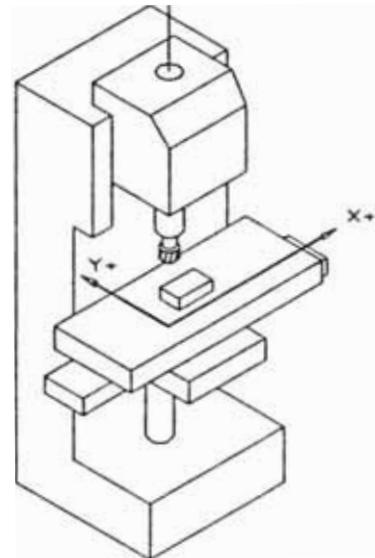
Todo esto permite alcanzar velocidades de avance bastante altas.

Debe mencionarse que actualmente el control gobierna la posición de la mesa y no de la pieza propiamente dicha. Se espera en un futuro, utilizando el láser, controlar directamente la posición de la pieza y compensar así errores por dispersiones geométricas de las guías.

#### 2.3.4 Los Sistemas de Ejes

En las máquinas de control numérico los desplazamientos se programan teniendo en cuenta los ejes de coordenadas y un origen de los mismos. Por tanto, es necesario identificar el sistema de ejes en las máquinas herramientas.

Mediante el sistema **Figura 2-1** de ejes cartesianos XYZ posicionaremos la herramienta en el punto programado. Para lograr una estandarización en cuanto a la disposición de ejes en las máquinas se ha considerado lo siguiente: El eje Z debe corresponder con la dirección del eje



del husillo principal, que proporciona la potencia de corte. Si no existe husillo principal el eje Z se toma normal al plano de sujeción de la pieza. Por ejemplo máquinas de oxicorte, trazadoras, etc. El sentido positivo corresponde al aumento de la distancia de la herramienta a la pieza.

El eje X es un eje de traslación principal, horizontal y normal al eje Z y, por tanto, paralelo a la superficie de sujeción de la pieza. En las máquinas en que la herramienta

tiene rotación, tipo fresas, hay que tener en cuenta si este eje Z es horizontal o vertical.

Si se trata de fresadoras verticales (eje Z vertical), el eje X es horizontal y su sentido es positivo a la derecha de un observador que mira del husillo hacia la columna.

El eje Y es un eje de traslación principal elegido de manera que con los ejes X y Z forme un triedro de sentido directo. Es decir, el sentido positivo se define según la ley del sacacorchos. En el diagrama se muestra los ejes de una fresadora vertical.

Aparte de los ejes cartesianos se definen unos ejes de rotación ABC alrededor de estos ejes principales, y se toma el sentido siguiendo la regla de la mano derecha. El eje A se define para giros alrededor del eje X, el eje B para rotaciones según el eje Y, y el eje C según el eje Z.

Hay que diferenciar los ejes en el caso en que sea la herramienta la que se desplaza con respecto a la pieza, y el caso en que la pieza se mueve con respecto a la herramienta. En este último caso, los ejes se indicarán con un apóstrofe: X'Y'Z' o A'B'C'.

Debemos definir la ubicación del origen de coordenadas del sistema de ejes. Para esto

debemos conocer algunos términos utilizados en estas máquinas:

**Punto Cero Máquina** : Para ejecutar los desplazamientos programados en el control se necesita un punto de referencia (Cero Máquina). Para ubicar este punto, cada eje dispone de topes o dispositivos detectores de posición que definen la posición cero de cada uno de ellos. De esta forma, se predispone la máquina para ejecutar el programa en relación a un cero absoluto que es definido por el constructor. En los tornos el cero máquina coincide con la intersección del eje del husillo principal con la superficie de apoyo de la brida del mismo. En la fresadora se ubica en la esquina inferior izquierda delantera de su campo de trabajo.

**Punto Cero Pieza** : Podemos establecer un punto distinto al cero máquina como origen de coordenadas de los ejes. Debemos definir en el control las distancias de este cero pieza con respecto al cero máquina. Aún cuando los desplazamientos programados estarán referidos a este nuevo punto, el controlador las suma a las coordenadas de desplazamiento del mismo y en realidad la máquina trabaja con coordenadas absolutas respecto a su cero máquina.

**Punto Cero Flotante** : En este caso las máquinas no tienen ningún dispositivo de posicionamiento

de origen. En cada caso se fija el origen posicionando la herramienta en un punto y validando esta posición como origen de coordenadas tanto para el programa como para la máquina.

### **2.3.5 Cambio de Herramienta**

Para evitar paradas en la fabricación de las piezas se ha desarrollado sistemas para realizar cambios de herramienta en forma automática.

Un sistema es el que hace uso de una torreta en la que se colocan las herramientas necesarias en sus caras. De este modo, al pedir una herramienta, la cara correspondiente se colocará en posición de trabajo. Este sistema permite el uso de pocas herramientas.

Para utilizar mayor número de herramientas, se acopla a la máquina un almacén de tambor o de cadena y un manipulador, generalmente de dos brazos, para cambiar la herramienta que se encuentra en uso por otra del almacén.

Existen diversas formas de identificar a las herramientas del almacén. Una de ellas es colocar cada una de las herramientas en una posición fija del almacén y al llamar a una herramienta determinada, la cadena almacén girará hasta ubicarla.

Otra forma más sofisticada consiste en

disponer códigos de identificación en las propias herramientas y un lector del código. Por tanto, no interesa la posición de las herramientas en el almacén sino que el sistema irá leyendo los códigos de las herramientas hasta encontrar la herramienta deseada.

### ***Las Herramientas***

Las herramientas utilizadas en las máquinas de C.N. de cambio manual son las mismas que encontramos en el mecanizado convencional y los criterios de selección son prácticamente los mismos.

A medida que se ha incrementado la aplicación de cambiadores automáticos, el diseño de herramientas ha evolucionado hacia una mayor estandarización y flexibilidad de utilización en varias máquinas, así como hacia la adopción de sistemas de acoplamiento rápido. Nace el concepto de BTS -Block Tool System- o sistema de bloques de herramientas. Consiste en pequeñas unidades de corte, formadas por la plaqueta y un reducido cuerpo de fijación, que se insertan a adaptadores o acoplamientos intermedios montados sobre el portaherramienta.

Este sistema permite un cambio automático muy rápido y una misma herramienta puede montarse en máquinas distintas a las que

se ha acoplado el adaptador correspondiente.

En los centros de mecanizado, la fijación se efectúa mediante cono normalizado, que proporciona el centrado de la herramienta y una fuerza tensora aplicada desde la parte posterior del husillo. Para el cambio automático de herramientas se dota al portaherramientas de un dispositivo de tensado adecuado.

Los sistemas de producción automática introducen dos nuevas funciones referidas a las herramientas:

El Prerreglaje (Presetting), el cual tiene por objeto conocer las cotas de la punta de la herramienta respecto al punto de referencia, previamente a su utilización, para introducirlos en la memoria del control.

La monitorización de la herramienta tiene por objeto detectar rotura de herramientas, colisiones, desgaste de las mismas, etc.

#### **2.3.6 Medición de Piezas y Herramientas**

Para comprobar las cotas del mecanizado, se utilizan actualmente palpadores o dispositivos adecuados montados en el portaherramientas, los cuales envían las dimensiones actuales de la pieza. La máquina debe poseer sistemas de limpieza de la pieza, autocorrección del gradiente de temperatura y un sistema adecuado

de medición para evitar medidas falsas.

En algunos controles se incluyen sistemas de detección de desgaste o rotura de la herramienta usando para ello, sensores ópticos o palpadores. De acuerdo a las mediciones, el control corrige automáticamente la trayectoria de la herramienta para mantener las dimensiones de la pieza dentro de las tolerancias establecidas.

### 2.3.7 Control de las condiciones técnicas del mecanizado

Al programar los desplazamientos y velocidades de avance de los carros se toma en cuenta el material a mecanizar, la potencia de la máquina y el acabado que se requiere.

Sin embargo, en el momento del mecanizado se pueden presentar condiciones que no son las más adecuadas, ya sea por materiales no homogéneos, desgaste de herramienta, etc.

La solución de estos problemas se logra mediante sistemas de control adaptativo que detectan mediante captadores los esfuerzos, la potencia consumida, vibraciones, etc., y modifican la velocidad de avance para mantener los parámetros deseados dentro de sus límites.

Debe considerarse también la refrigeración durante el mecanizado, ya que debido al arranque

de viruta en grandes proporciones, tanto la pieza como la herramienta se calientan y necesitan un elevado caudal de refrigerante el cual incluso deberá llegar no solo a la pieza o herramienta sino a partes de la máquina misma.

#### 2.4 Proceso de Programación de una Máquina Herramienta CNC

La programación de una máquina herramienta de control numérico consiste en elaborar y codificar la información necesaria para mecanizar una pieza en un lenguaje que la máquina sepa interpretar.

La programación requiere por parte del programador un conocimiento completo de las facilidades que le ofrece la máquina herramienta y también de las posibles operaciones que el control permite realizar. Por ello es conveniente que el programador haya tenido experiencia previa con máquinas herramientas convencionales.

La programación puede dividirse en tres partes:

- 1) Preparación del trabajo.
- 2) Codificación del programa.
- 3) Prueba y puesta a punto.

En la fase de preparación de trabajo se debe estudiar las características de la pieza a fabricar, identificar las máquinas que sirvan para la fabricación y las facilidades que brindan. Debe definirse las herramientas a utilizar y establecer la forma de fijación de la pieza durante el mecanizado.

A partir de esto se genera la secuencia de las operaciones del mecanizado para proceder a programarlas.

Las prestaciones que ofrece un control son muy variados, y dependerán también de la complejidad y sofisticación de la máquina herramienta que gobierna. El programador deberá tener en cuenta el tamaño y materiales de las piezas que se pueden mecanizar en la máquina herramienta que vaya a utilizar. Luego debe definirse el proceso de mecanizado.

Este puede dividirse en las siguientes etapas:

Estudio del plano de la pieza a fabricar.

Análisis de las operaciones elementales.

Selección de las herramientas.

Definición de las condiciones técnicas de mecanizado.

Diseño de utillajes.

Secuenciación de las fases de trabajo.

En la primera etapa el programador estudia las características de la pieza a fabricar. A continuación, se descompone las superficies a mecanizar en tramos correspondientes a las trayectorias que las herramientas pueden seguir, tomando como base trayectorias lineales o circulares. Para esto debe definir los puntos de inicio y fin de la traslación, así como los centros de las trayectorias circulares.

La elección de la herramienta dependerá de la forma de trabajo y del acabado que quiera darse a la

pieza.

Las condiciones técnicas de mecanizado, es decir velocidad de avance, profundidad de pasada y velocidades de corte se definen de acuerdo al material y herramientas utilizadas. La selección del utillaje permitirá fijar la pieza para disponer del máximo de superficies libres para mecanizado.

En la última etapa se establece el orden en que se mecanizarán las distintas fases.

Al completar la definición del proceso de mecanizado, el programador puede empezar a codificar el programa. En general, esta fase de codificación es la que recibe el nombre de programación del control numérico.

En la fase de codificación del programa se transcribe cada una de las operaciones anteriormente definidas en códigos que la máquina sea capaz de interpretar. Para esto es necesario conocer la sintaxis del lenguaje que se emplea en las máquinas de control numérico, el cual será explicado posteriormente con detalle.

En este tipo de lenguaje el programador descompone la información en operaciones elementales a ejecutar por la máquina, por ejemplo, un recorrido, un cambio de herramienta, etc. Cada una de estas operaciones elementales constituye un "bloque" o una fase del programa. Las distintas funciones de cada bloque se identifican con una letra o dirección y los

caracteres que siguen a esta letra especifican el valor directo o codificado de esta función.

En la etapa de **prueba y puesta a punto** se trata de comprobar que la codificación haya sido programada sin errores. Para esto es posible hacer uso de los simuladores gráficos del que disponen algunos controles. En estos simuladores se mostrará la trayectoria que seguirá la herramienta en cada uno de los planos de los ejes de coordenadas. Si no se dispone de esta herramienta, entonces se puede comprobar directamente en la máquina haciendo una prueba en vacío, es decir, sin colocar la pieza a fabricar, o colocando un material blando para verificar el correcto desplazamiento de la herramienta. En este proyecto se ha diseñado un simulador usando el lenguaje AutoLisp del AutoCAD.

## 2.5 Códigos de Lenguaje de C.N. utilizado en Máquinas Herramientas

A continuación se define las funciones utilizadas en Control Numérico:

- 1) N numeración del bloque.
- 2) G función preparatoria.
- 3) XYZ desplazamiento en las direcciones principales.
- 4) IJK coordenadas auxiliares.
- 5) F velocidad de avance.
- 6) S velocidad de rotación.

- 7) M función auxiliar.
- 8) T número de herramienta.

El orden de estas funciones o palabras dentro del bloque es variable según el constructor del control, pero en general coincide con el señalado.

### **Función N**

Es la primera palabra del bloque. Sirve para numerar correlativamente los bloques y ayudar a su localización. Los bloques se ejecutarán secuencialmente según la numeración. Su formato es N03 o N04. El 3 y 4 indican el número máximo de cifras a utilizar en la codificación y el 0 indica que pueden suprimirse los ceros a la izquierda.

### **Función G**

G es la dirección de las funciones preparatorias que indican la operación que llevará a cabo el control y que se especifica mediante el resto de palabras. Su formato es G2 lo que significa que pueden programarse 100 funciones distintas codificadas del 00 al 99. Las posibles funciones G se explicarán posteriormente.

### **Funciones de desplazamiento o de coordenadas**

Las direcciones X,Y,Z indican la cota que debe alcanzar cada eje en su movimiento. Las otras direcciones I,J,K tiene distintas funciones auxiliares, que pueden indicar el centro de arco

descrito por la herramienta, profundidad de pasada, número de agujeros a taladrar, etc. Su formato, trabajando en milímetros, acostumbra ser X+04.3, en donde X es la letra de la dirección; el + indica que pueden programarse signos positivos (+) y negativos (-), el cero que pueden suprimirse los ceros a la izquierda y el 4.3 que las cotas pueden tener como máximo 4 cifras enteras y 3 decimales.

#### **F Velocidad de Avance**

La dirección F sirve para fijar el valor de la velocidad de avance. El valor puede estar dado en mm/minuto para torno y fresa, o en mm/revolución en caso de tornos. Su formato es F04 (mm/minuto). En caso de mm/rev el formato será F02.2.

#### **S Velocidad de rotación**

Sirve para programar la velocidad del husillo. Está dado en rev/minuto. Su formato es S04.

#### **T Función de herramienta**

Esta función permite seleccionar la herramienta a utilizar y a la vez extraer los datos de dicha herramienta a partir de una Tabla de Herramientas. Estos datos especifican el radio y la longitud de la herramienta, así como correcciones por desgaste de la misma. El formato es T2.2 (0 a 99 herramientas y de 0 a 99 valores de corrección).

### **M Función Auxiliar**

Se utiliza para indicar condiciones de funcionamiento de la máquina: sentido de giro, cambio de herramienta, parada, fin de programa, etc. Su formato es M2 lo que significa que se dispone de 100 códigos distintos.

Los fabricantes de equipos de máquinas herramientas de control numérico basan las codificaciones propias de sus equipos en estas normas, pero en general eliminan algunos códigos no aplicables y los complementan con códigos propios.

Más adelante se hará una descripción de las funciones que serán parte del sistema diseñado. Estas funciones son las más comunes en los distintos controles existentes en el mercado.

## **2.6 Programación del Control Numérico**

Para la programación de los bloques del proceso de mecanizado se ha elaborado un editor desarrollado en lenguaje Pascal (ver Capítulo 4). Dicho editor usa el formato siguiente:

```
N3 G2 X+04.2 Y+04.2 Z+04.2 I+04.3 J+0.4.3 F3 S3 M2 T1
```

En algunos controles el orden de las funciones dentro del bloque pueden ordenarse como se desee. En nuestro caso debe conservarse el orden anteriormente propuesto.

Hay que tener presente que no es necesario programar todas las funciones en un bloque. Puede ser

que un bloque solo contenga una función auxiliar o solo las coordenadas del desplazamiento, etc.

Existen funciones a las que se denominan **modales** que son las que se programan en un bloque y continúan en vigencia hasta que se cancele o se programe otra función del mismo grupo. Habrá funciones que serán las de **cancelación automáticas**, es decir, solo están en vigencia en el bloque en que se les ha incluido.

#### **2.6.1 Numeración del Bloque N**

Cada bloque del programa debe especificarse mediante un número que indicará el orden en que debe ejecutarse los bloques. El sistema permitirá programar hasta 250 bloques, y la numeración podrá ser de 0 a 999.

Es conveniente realizar la programación de los bloques numerándolos de 10 en 10, de tal modo que si hubiese que insertar un bloque más dentro de dos líneas no sea necesario renumerar todas las líneas.

#### **2.6.2 Programación de las Funciones Preparatorias G**

Esta función permite especificar teóricamente 100 operaciones distintas al control. Sin embargo, solo unas cuantas de ellas son usadas en forma obligatoria, dejándose el resto para que los fabricantes de control numérico incluyan sus propias funciones.

Dentro de las funciones G existirán las funciones modales y de cancelación automática. Por tanto deben conocerse qué funciones son de un mismo grupo, y cuáles cancelan o no a la función previamente programada.

En casi todos los casos las funciones G necesitarán los valores de X,Y,Z y en algunos casos también los de I y J. Estas indicarán el desplazamiento en cada uno de los tres ejes de la fresadora y algún dato adicional indicado por I y J.

La siguiente tabla muestra las funciones G utilizadas en este sistema y su descripción.

Tabla 2-1 : Funciones G para la fresadora vertical

Instrucción	Descripción
G00	Avance rápido
G01	Avance lineal
G02	Avance circular en sentido horario
G03	Avance circular en sentido antihorario
G04	Tiempo de espera
G40	Fin ciclo de compensación de herramienta
G41	Compensación por radio (Herramienta a la izquierda de la pieza)
G42	Compensación por radio (Herramienta a la derecha de la pieza)
G77	Ciclo de Taladrado en Círculo Graduado
G90	Programación en coordenadas absolutas
G91	Programación en coordenadas relativas
G92	Modificación del punto cero

Para el desplazamiento habrá que tener en cuenta si se realiza en coordenadas absolutas o

relativas. En este sistema se asume que los desplazamientos están dados en milímetros. Asimismo, debe definirse el origen de la pieza con el punto programado. Existirá una función G que realiza esta operación.

### **G00 Posicionamiento Rápido**

Esta instrucción efectúa un desplazamiento lineal al punto indicado mediante las coordenadas X,Y,Z. Este movimiento lo realizará a la mayor velocidad posible de la máquina. Debe tenerse cuidado que al efectuar este movimiento no debe realizarse ningún arranque de viruta.

Al momento de programarse esta función debe analizarse si habrá posibilidades de colisión. Normalmente este código se programa para realizar un acercamiento de la herramienta a la pieza, alejamiento de la herramienta para realizar un cambio de la misma, para efectuar salidas rápidas después de efectuar un taladrado, etc.

### **G01 Interpolación Lineal**

La instrucción G01 origina el desplazamiento hacia las coordenadas de X,Y,Z a partir del punto en que se encuentra. El movimiento se ejecuta en forma lineal y a la velocidad de avance especificada por la función F que está

dado en milímetros por minuto. Para lograr el desplazamiento mediante una trayectoria recta, los tres ejes se mueven simultáneamente y alcanzan el punto final en un mismo instante.

Ya que es un movimiento para mecanizado, el husillo debe estar girando para producir el arranque de viruta.

Es posible que la función de corrección por radio de herramienta (G41,G42) esté activada, y por tanto las nuevas coordenadas del desplazamiento a efectuar serán calculadas previamente.

### **G02-G03 Interpolación Circular**

Se programan para realizar movimientos que tengan una trayectoria circular, ya sea en sentido horario (G02) o antihorario (G03). Esto requiere de las coordenadas X,Y,Z que indican el punto final del arco, y también de las coordenadas I,J las cuales dan la distancia del centro del arco al punto en que se encuentra en ese momento la herramienta. Para lograr esta trayectoria circular, el control se encarga de dividir dicha trayectoria en tramos rectos muy pequeños, y calcular cada uno de los puntos a los que deberá desplazarse.

#### **G04 Tiempos de Espera**

Mediante esta instrucción podemos detener el proceso de mecanizado durante un tiempo dado en segundos y que será leído del parámetro X. Después de la espera, se procede a ejecutar el siguiente bloque. Esto nos puede permitir verificar el estado de la herramienta, efectuar mediciones, limpiar la viruta, etc.

#### **G40 Fin de Compensación por Radio de la Herramienta**

En la fresadora existen mecanizados en que queremos dar un contorno deseado a la pieza. Debido al radio que tiene la fresa, debemos desplazar la herramienta una distancia igual a su radio hacia la izquierda o derecha dependiendo del contorno deseado. Gracias al control, el programador no tiene que calcular las nuevas coordenadas de la trayectoria sino que el control se encarga automáticamente de calcular el desplazamiento paralelo al perfil programado. Esta instrucción se encarga de cancelar el ciclo por corrección de herramienta activado por G41 o G42.

#### **G41-G42 Inicio Compensación por Radio de Herramienta**

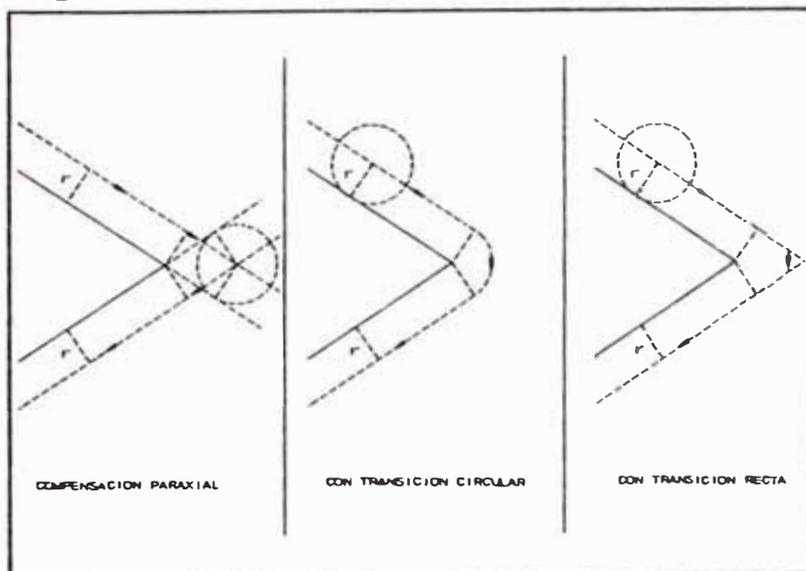
Al programar una de estas dos instrucciones, las

nuevas trayectorias a seguir tendrán en cuenta el radio de la fresa para desplazarse hacia la izquierda (G41) o a la derecha (G42) y obtener un desplazamiento paralelo al perfil programado. La izquierda o derecha se toma con respecto al sentido del mecanizado.

La activación de estas funciones debe hacerse en el bloque de acercamiento a la pieza ya que inicialmente la trayectoria la hará partiendo del punto en que se encuentra hacia un punto desplazado corregido. Al llegar dicho punto, el centro de la herramienta se encontrará sobre la normal a la tangente del punto inicial de la siguiente trayectoria y a una distancia igual al radio de la herramienta.

Cuando existen dos trayectorias contiguas que forman un ángulo entre sí, la transición puede efectuarse de dos maneras según se muestra gráficamente.

Figura 2-2



En nuestro sistema se optó por la transición circular ya que se evitan desplazamientos innecesarios. Debe tenerse presente que las correcciones se realizan solo en el plano XY, por tanto, mientras esté activada G41 o G42, la coordenada Z deberá permanecer constante.

### **G77 Ciclo de Taladrado en círculo graduado**

Esta instrucción realiza un ciclo de taladrado de un número de agujeros equidistantes dispuestos en un círculo. El centro de este círculo será el punto en que se encuentra antes de ejecutar el ciclo. La coordenada X indicará el radio de dicho círculo, Z indica la profundidad de taladrado a partir de la cota en que se encuentra. El número de agujeros estará dado por J y el control se encarga de calcular el ángulo que separará a cada uno de ellos para que queden equidistantes sobre el círculo. El primer agujero se hará en la intersección del círculo con la recta que forma un ángulo I con el eje X. A partir de este punto se harán los demás agujeros.

El taladrado en sí lo hará a la velocidad de avance programada mientras que la salida del agujero y el acercamiento a cada uno de ellos lo hará a la máxima velocidad posible.

Al finalizar el ciclo, la herramienta de

desplazará al centro del círculo, es decir, al punto donde inició el ciclo.

#### **G90 Programación en coordenadas absolutas**

Al iniciar el proceso de mecanizado debe definirse un punto cero pieza y ese punto será tomado como el origen de coordenadas. Las coordenadas dadas con respecto a este punto se considerarán absolutas. Esta función es modal y se toma por defecto al iniciar el programa.

#### **G91 Programación en coordenadas relativas**

Cuando se trabaja con esta instrucción activada, las coordenadas del punto programado están referidas al punto anterior de la trayectoria, es decir, los valores programados indican el desplazamiento a realizar en el eje correspondiente.

#### **G92 Modificación del Punto Cero**

Por medio de esta función se puede modificar el punto cero de la máquina. Al ejecutar esta función no se efectúa ningún movimiento de los ejes sino que el control acepta los valores de los ejes programados por X,Y,Z como nuevo origen de coordenadas.

### 2.6.3 Programación de la Velocidad de Avance F

Esta es la velocidad con que desplaza la pieza en relación con la herramienta. El avance debe especificarse al principio del programa y será válido hasta que se vuelva a reprogramar. En el caso de la fresadora, el avance está en mm/min. Si la trayectoria se produce en 2 ó 3 ejes, el avance seguirá manteniéndose ya que el control se encarga de desplazar cada eje a una velocidad que resulta de hallar la componente vectorial de la velocidad total sobre cada eje.

### 2.6.4 Programación de la Velocidad de Giro del Cabezal

La función S se encarga de programar la velocidad en RPM del husillo y se asume que girará hacia la derecha. En nuestro sistema, el control permite que la velocidad de giro varíe entre 200 y 2000 RPM. La velocidad de giro será constante.

### 2.6.5 Programación de Funciones Auxiliares M

Como se mencionó anteriormente, esta función hace referencia al modo de funcionamiento de la máquina herramienta y del control numérico. Al igual que las funciones G, existen funciones ya definidas para la función M; también existen las que son modales y las de cancelación automática.

Se muestra a continuación las funciones que tendrá el control diseñado.

Tabla 2-2 : Funciones M para la fresadora vertical

Instrucción	Descripción
M02	Fin de programa (Incluye M05)
M03	Marcha del husillo a la derecha (Horario)
M05	Paro del Husillo
M06	Cambio de Herramienta
M30	Fin de Programa y retorno a primera línea.

#### 2.6.6 Programación de la Herramienta T

La función T permite seleccionar a partir de una tabla existente en el programa, el diámetro de la herramienta a utilizar. Existe una gran diversidad de herramientas para la fresadora, y en el editor se especificará el número de la herramienta correspondiente. Este dato servirá principalmente para realizar la corrección por radio de la herramienta cuando se halle activada. Podrá seleccionarse 10 distintas herramientas (del 0 al 9). Esta función deberá programarse al principio del programa. De no hacerlo se asumirá la herramienta 0.

## 2.7 Dispositivos de Accionamiento

### 2.7.1 Motores de Paso

Los motores de paso son motores de corriente continua pero, en vez de ser alimentados por un flujo continuo de corriente, son manejados por pulsos de corriente. Cada pulso emitido hace girar el eje del motor un

ángulo pequeño. A mayor cantidad de pulsos, mayor el ángulo de giro.

Los motores de paso son dispositivos digitales, y su control se hace fácil cuando se use un computador para utilizarlo.

Sin embargo, estos motores son más complicados de utilizar que los motores de corriente continua, aparte de ser más costosos y difíciles de conseguir. Pero cuando se trata de resolver problemas de desplazamientos controlados, estos motores lo resuelven sin mayores dificultades.

#### **2.7.1.1 Tipos de Motores de Paso**

Existen básicamente dos tipos de motores de paso:

- Motores de imán permanente
- Motores híbridos.

Empezaremos explicando el principio de funcionamiento de estos motores de paso.

##### **Motores de Paso de Imán Permanente**

Se denominan así ya que el rotor es un imán permanente cilíndrico, con un número de polos fijos , y su número es limitado debido a las características del material magnético. El ángulo de paso de un motor de este tipo depende de la relación entre el número de polos magnéticos del estator y el número de polos

magnéticos del rotor. Con rotores de imán permanente solo puede obtenerse ángulos de giro relativamente altos. Sin embargo, es posible reducir el ángulo de giro utilizando más estatores. Así se conseguirán ángulos de paso de hasta  $3.75^\circ$ .

La configuración del estator comprende 2 o más estatores, y cada uno tiene una bobina a través del cual pasa una corriente que genera un campo magnético. Invirtiendo la dirección del flujo de corriente podemos trasladar los polos. Realizando esta operación a través de bobinas de estatores sucesivas podemos crear un campo magnético giratorio que será seguido por el rotor de imán permanente. La velocidad de rotación dependerá de la velocidad a la que las bobinas del estator (y por tanto de los polos electromagnéticos) son energizadas, y la dirección de rotación por la secuencia de energización.

Existen dos formas de energizar las bobinas del estator, por lo cual se distinguen dos tipos de motores de paso: unipolares y bipolares.

#### *Motores Unipolares.*

Cada bobina del estator está provisto de un borne central, tal como se aprecia en el diagrama, el cual está conectado a la fuente que puede ser el polo positivo. La dirección del

flujo de corriente de la bobina se determina por el terminal que esté conectado al polo negativo de la fuente por medio de un dispositivo de permutación. Permutando estas medias bobinas se logra invertir las polaridades del estator. En la figura se muestra

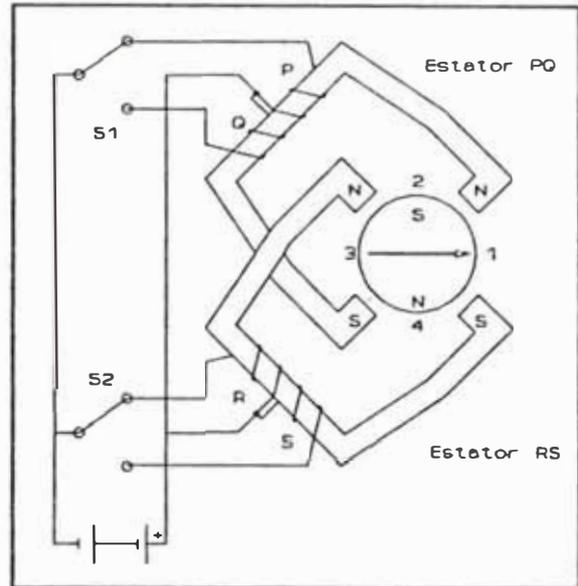


Figura 2-3

un motor de 2 estatores (4 fases). Se aprecia cuál debe ser la posición de los interruptores S1 y S2 para lograr un giro de 90 grados. El imán permanente tiene dos polos por simplicidad, aún cuando en realidad puede tener hasta 24.

*Motores Bipolares*

De la figura apreciamos que las bobinas del estator no tienen un borne central, sino que el flujo de corriente se invierte permutando ambas

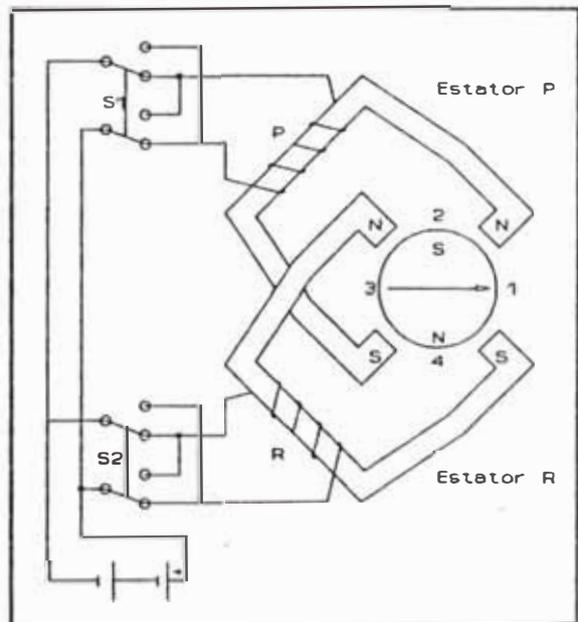


Figura 2-4

líneas de la fuente. La operación de este motor es idéntico al motor unipolar. En la figura se muestra un motor de 2 estatores (2 fases).

### **Motores de paso Híbridos**

Esta clase de motores permite que el ángulo de paso y tamaño de los motores sean más pequeños que los que se logran con los motores de imán permanente. El diseño consiste en cuatro estatores dispuestos cara a cara alrededor de una bobina, formando de esta manera dos partes de estatores cerrados unidos por un imán permanente, tal como se muestra en el esquema. La parte interna de la circunferencia de cada estator tiene dientes, y el número de éstos dependerá del ángulo de giro requerido.

El rotor consiste de 4 discos, cada uno con un número de dientes igual al del estator. Los discos del rotor están desfasados uno de otro por la mitad del paso de un diente de tal forma que permitan la secuencia de energización de las bobinas. Los dientes de los estatores están alineados. El flujo del imán permanente es distribuido a través de cada estator y cerrado por el rotor. Cuando la bobina del estator se energizan alternadamente y en ambas direcciones aparece un campo magnético giratorio que es seguido por el rotor. A cada paso de la

secuencia de energización, el diente de un disco del rotor se alinea con el diente del estator.

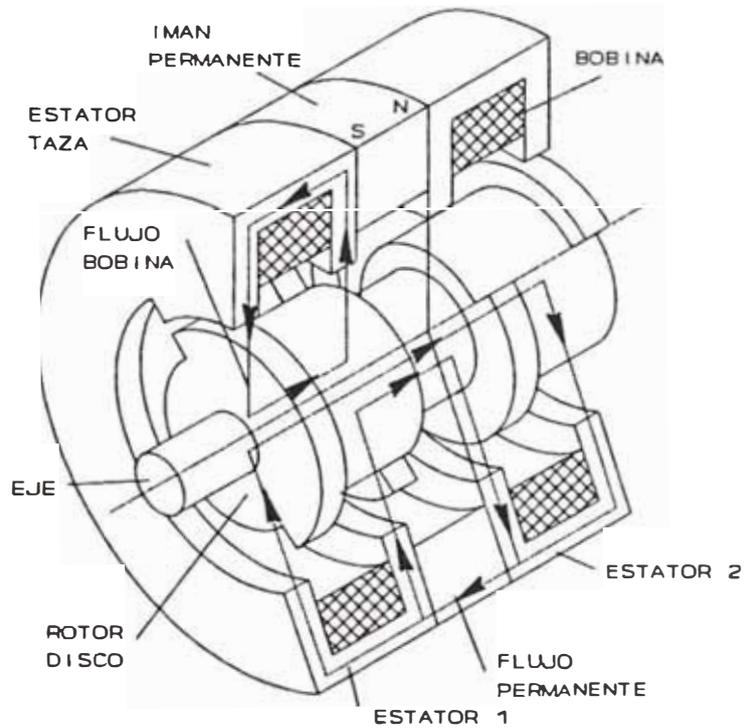


Figura 2-5

En la figura se muestra el diseño de motor de 4 fases. Por simplicidad, hay un diente por cada disco del rotor y estator y, por tanto, el ángulo de giro será de  $90^\circ$ . Los motores híbridos pueden alcanzar un ángulo de paso de hasta  $0.9^\circ$ .

#### 2.7.1.2 Características de Diseño de Motores de Paso Angulo de Paso

Los motores de paso varían en la magnitud de giro por cada pulso enviado a la bobina. El ángulo que rota el eje es denominado ángulo de paso y puede variar desde  $0.9$  hasta  $90$  grados.

El ángulo de paso determina el número de

pasos por revolución. Así, un motor de ángulo de paso de 1.8 grados tendrá que enviársele 200 pulsos para completar una vuelta. Para un ángulo de paso de 7.5° se necesitan 48 pulsos por revolución. En un motor de paso, cuanto menor el ángulo de paso, mayor la precisión obtenida.

### **Torque de Retención**

Estando detenido y energizado una bobina del motor será necesario un torque para desviar el motor un paso. Esto es conocido como torque de retención. Cuando se aplica un torque que excede al de retención, el motor rotará en forma continua. Este torque de retención normalmente es mayor que el torque de trabajo y actúa como un freno manteniendo la carga en posición.

### **Torque Residual**

Debido a los imanes permanentes, los motores de paso tienen un torque de freno aun sin estar energizados. A este torque se le conoce como torque de retención.

### **Torque de Trabajo (Dinámico)**

Las características dinámicas o de trabajo de un motor de paso se indica normalmente en curvas de torque versus velocidad de giro.

### **Comportamiento en un paso**

Cuando se hace girar al motor un paso, el rotor tiende a sobrepasar y oscilar sobre su posición final. Este comportamiento es normal en cualquier sistema dinámico de pulsos. Este comportamiento variará de acuerdo a la carga y a la corriente de energización. Esta respuesta puede ser modificada incrementando la carga de fricción o añadiendo algún amortiguamiento mecánico. Sin embargo, es preferible usar amortiguamiento electrónico, ya que el primero es más costoso y complejo.

### **Resonancia**

Un motor de paso operado sin carga por encima de su rango de frecuencia de trabajo podrá llegar a un punto en que aparecerá una señal audible o empezará a vibrar. Para evitar esto, deberá evitarse trabajar en este rango, añadir algún tipo de amortiguamiento externo o aumentar la inercia.

### **Secuencia de energización**

Para explicar la secuencia de energizado de un motor de paso haremos referencia a los motores unipolares de 4 fases. En este tipo de motores se dispone de seis cables. Los cables comunes se conectan normalmente al polo positivo de la

fuente. Cada bobina es energizada secuencialmente conectándola a tierra por un pequeño lapso de tiempo. El eje del motor gira entonces un paso cada vez que se energiza una bobina. Para que el eje gire correctamente, las bobinas deben energizarse en secuencia. En el diagrama siguiente vemos como debe ser la secuencia de energizado de cada bobina para lograr el giro. Esto ocurre en un motor de ángulo de paso de 90 grados.

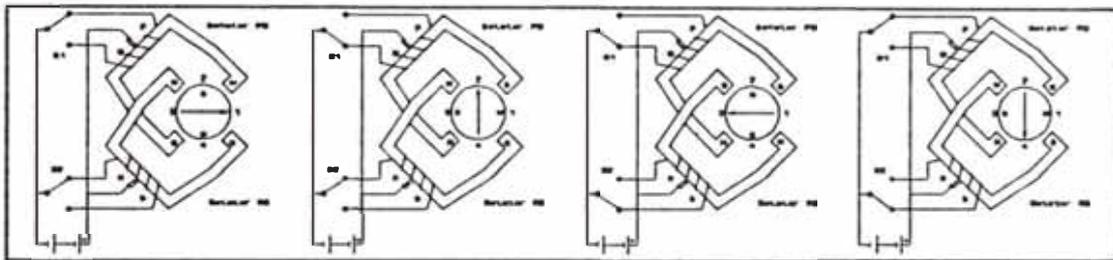


Figura 2-6

El caso anterior se refiere al encendido de una bobina en cada paso. Sin embargo, si se quiere conseguir una mayor torque del motor podemos energizar dos bobinas simultáneamente, tal como se aprecia en el siguiente esquema.

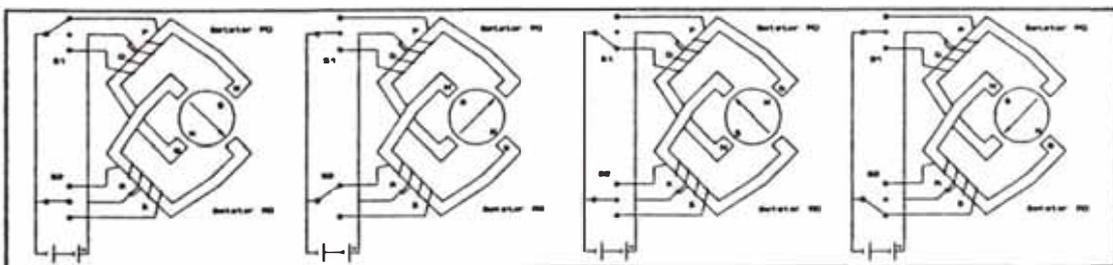


Figura 2-7

En ambos caso, invirtiendo la secuencia se logra hacer girar al motor en sentido contrario. Las secuencias de energización se logran con

circuitos electrónicos que serán ampliamente detallados en el capítulo referente a los sistemas de control.

### Frecuencia de Pulsos

Al energizar secuencialmente las bobinas del motor, se observa que existe un límite en el número de pulsos que puede aceptar por segundo. Para motores de elevado torque, usualmente aceptan hasta 200 o 300 pulsos por segundo, de tal modo que tiene una velocidad efectiva de 1 a 3 revoluciones por segundo. Algunos pequeños motores pueden aceptar mil pulsos o más por segundo, pero no proveen mucho torque.

Hay que tener en cuenta también que estando los motores detenidos no es posible llevarlos a su velocidad máxima en forma inmediata. Si se intenta hacer esto el motor se trabará y no girará. Para alcanzar estas altas velocidades, el motor debe ser gradualmente acelerado. Es suficiente con iniciar el movimiento a  $1/4$  de su velocidad máxima por unos milisegundos, luego aumentar a  $1/2$ , a  $3/4$  y por último se llega a la velocidad máxima.

Al girar a velocidades altas también se presenta el problema de que el torque se reduce. Esto se debe a que la corriente no llega a alcanzar su valor nominal en cada bobina. Para

superar este problema hay 4 soluciones posibles: *Circuito Resistivo*, en el cual una resistencia alta es conectada en serie con la bobina del motor con el propósito de reducir su constante  $L/R$  y causar un rápida aumento de la corriente en él.

*Forzamiento de Voltaje* en donde inicialmente se aplica un alto voltaje a la bobina del motor para forzar que la corriente aumente rápidamente, y al llegar a su corriente nominal se aplicará el voltaje nominal.

*Forzamiento de Corriente* usa una fuente de corriente constante en vez de una fuente de tensión constante, y esto establece una corriente nominal inmediata a la bobina del motor.

*Control Chopper* aplica un alto voltaje a la bobina del motor causando un rápido aumento de la corriente en él. Cuando la corriente alcanza un 110% de la corriente nominal, la fuente de tensión se apaga. Esta se volverá a prender cuando la corriente esté en un 90% de la corriente nominal, y así sucesivamente.

### 2.7.2 Motores de Corriente Continua

Los motores de corriente continua se utilizan con mayor frecuencia en aplicaciones que requieran el control de velocidad.

Empezaremos mostrando el principio de funcionamiento de estos motores.

### 2.7.2.1 Principio de Funcionamiento

Los motores de C.C. hacen uso de un campo estacionario, y el propósito de los conmutadores es controlar la posición del campo del rotor sin tener en cuenta la velocidad de rotación o la frecuencia de la corriente que pasa por la bobina como el caso de los motores de C.A.

En la figura mostrada vemos que el conductor de una sola espira está montado en el eje de tal forma que pueda girar libremente en el campo magnético.

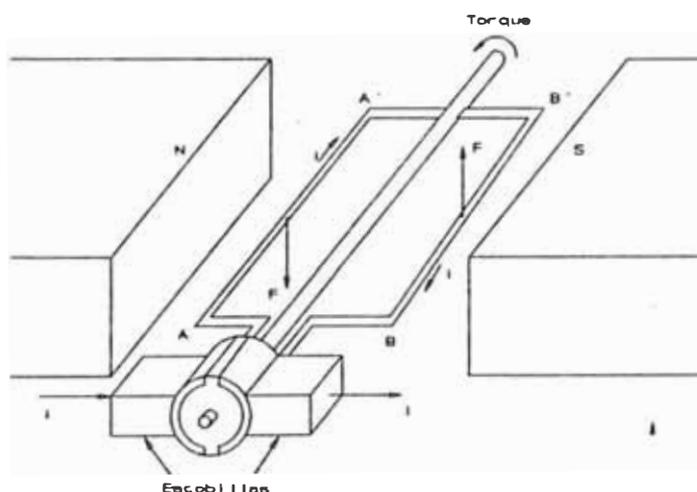


Figura 2-8

Si se hace pasar una corriente  $i$  en la dirección mostrada, aparecerá una fuerza hacia abajo en el lado izquierdo de la espira y una fuerza hacia arriba en el lado derecho, y por tanto la espira tenderá a girar en sentido

antihorario. Sin embargo, para mantener esta rotación la corriente  $i$  debe invertir su sentido en el momento en que el conductor AA' quede bajo el polo positivo. Esto es realizado por el conmutador, que consiste en un dispositivo aislado, que tiene dos segmentos de cobre que giran con la bobina.

Por otro lado están las escobillas, normalmente de grafito, que están fijadas a la carcasa del motor y que están en contacto con los conmutadores. Estos suministran la conexión con el circuito externo. Cuando la corriente  $i$  entra por la escobilla izquierda, dicha corriente fluye por el conmutador de cobre y de allí al lado AA' de la espira. La corriente regresa a través de B'B al otro segmento del conmutador y sale por la escobilla derecha. Cuando la espira AA' llega a la posición de BB' se invierte la corriente en la espira.

En motores reales el número de bobinas varía de 3 a 300 o más. El número de conmutadores también aumenta, ya que debe haber un conmutador por cada bobina.

Las características de los motores de C.C. están determinados por la manera en que se produce el campo principal.

Así distinguimos tres tipo de motores:

### Motor en derivación "shunt".

La bobina del campo principal se coloca en paralelo a la línea de C.C. Este tipo de excitación tiende a

dar un campo constante, y las características de torque-velocidad disminuirán solo por una caída de tensión

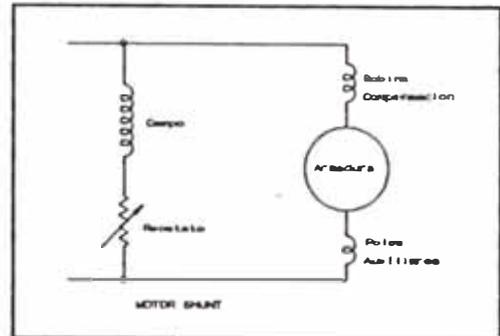


Figura 2-9

por resistencia en el circuito de armadura. Sin embargo el campo de armadura que surge de las corrientes en los conductores del rotor (reacción de armadura) tiende a desmagnetizar al campo principal en cierta medida. El resultado es que el motor shunt usualmente presenta una ligera concavidad en las característica torque-velocidad, como se muestra en la figura respectiva.

Este motor se adapta para trabajos que requieran de velocidad constante para distintas cargas. Por eso se utiliza para impulsar ejes de transmisión de velocidad constante, como puede ser en las máquinas herramientas. Como su velocidad puede variarse en forma eficiente, es muy útil cuando se necesitan velocidades ajustable como en los accionamientos individuales para máquinas herramientas.

### Motores en Serie.

Este motor tiene el bobinado del campo principal en serie con el circuito de armadura. Esto hace

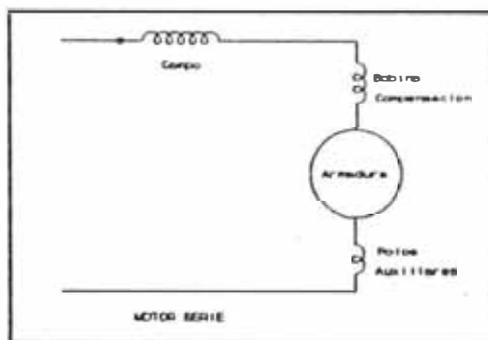


Figura 2-10

que la curva torque vs. velocidad muestre una velocidad alta sin carga. Debido al gran torque de arranque, estos motores se emplean para aplicaciones de tracción, grúas, montacargas, etc.

En la práctica, la velocidad del motor en serie inversamente proporcional a la corriente. Con sobrecargas, la velocidad cae a valores muy bajos.

### Motores Compuestos "Compound".

Estos motores tiene bobinas en serie y en paralelo ofreciendo por tanto características compuestas. Usualmente

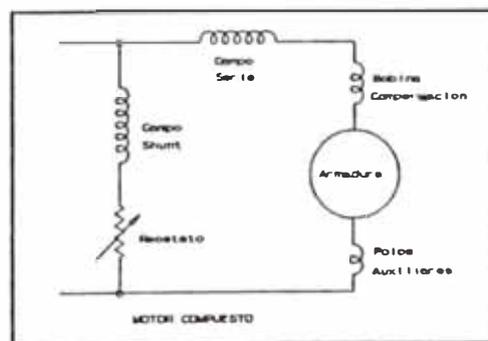


Figura 2-11

el campo en serie tiene poco efecto bajo condiciones de carga normal. Por ejemplo, un motor cuyo campo en serie contribuye con el campo paralelo tiende a girar como un motor en derivación bajo carga

normal, pero también desarrollará un torque alto de arranque debido a la contribución de la bobina en serie cuando está detenido.

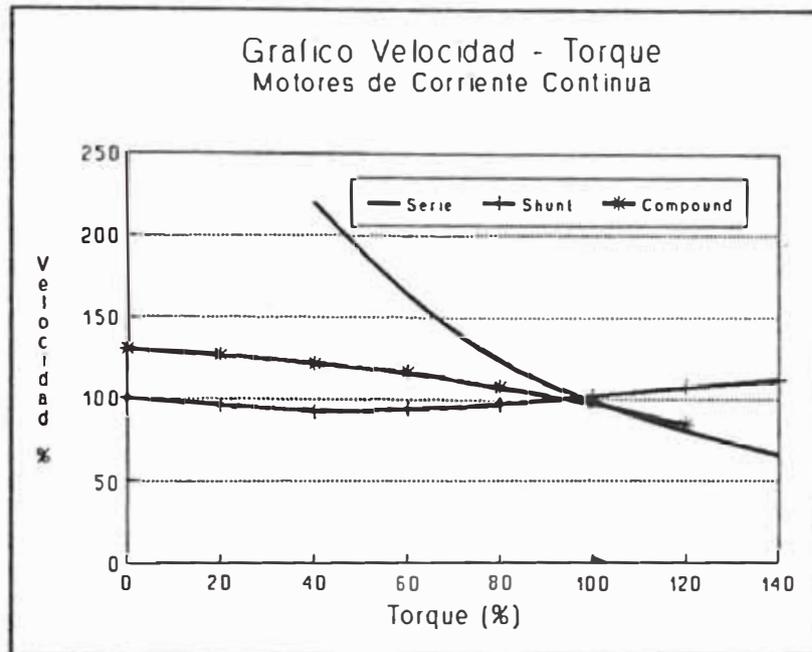


Figura 2-12

### 2.7.2.2 Control de Velocidad

Los motores de corriente continua son usados generalmente en aplicaciones de velocidad variable.

La manera más simple de controlar la velocidad en un motor shunt es variando la corriente del campo o la tensión de armadura.

La figura siguiente muestra el circuito para un motor shunt con una resistencia de armadura variable y una resistencia de campo variable. Si

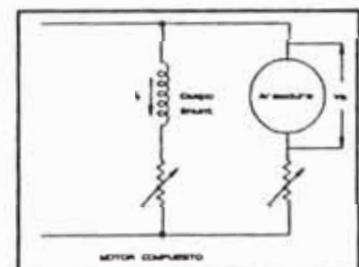


Figura 2-13

ambos se fijan en resistencia cero, el motor operará a su velocidad base. Disminuyendo la corriente del campo (aumentando la resistencia de campo) pero sin variar la tensión de armadura causará un incremento de

la velocidad del motor. La máxima velocidad que puede obtenerse de este modo es cerca al doble de la velocidad base.

Si la resistencia de campo es mantenida en cero y se disminuye la tensión de armadura agregando resistencia en serie con la armadura, la velocidad disminuirá. A continuación se muestra gráficamente los efectos de esta operación.

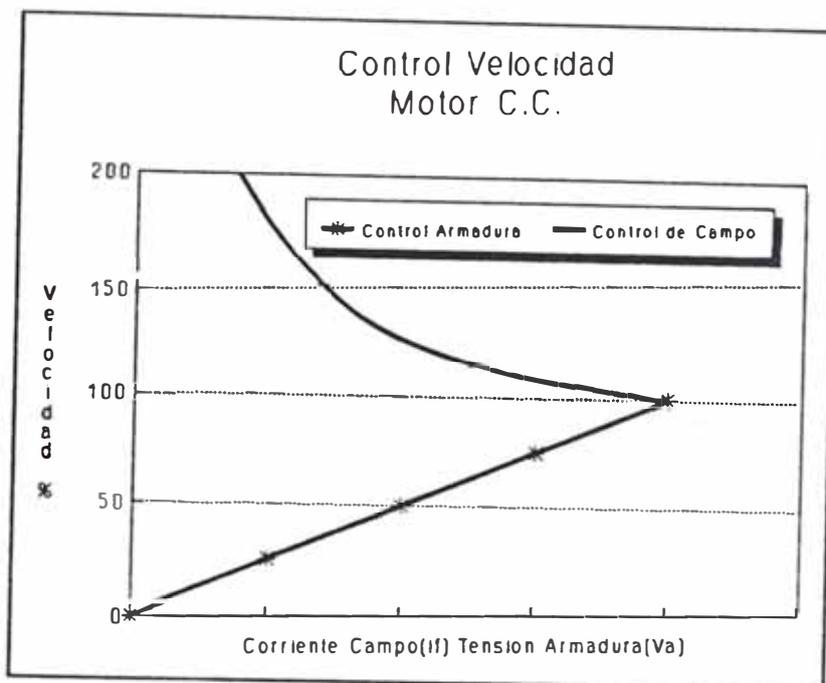


Figura 2-14

## CAPITULO 3

### TRANSMISIONES MECÁNICAS DE LA FRESADORA VERTICAL

Para lograr el desplazamiento de los carros longitudinal, transversal y vertical se ha optado por utilizar los motores de paso. Estos motores tienen la ventaja de poder posicionarse en forma precisa, y aunque no son de potencia elevada, serán los suficiente para el tamaño de esta fresadora vertical. La transmisión del motor al tornillo de avance se hará por medio de fajas y poleas dentadas.

En el caso del accionamiento principal, es decir, el que hace girar la herramienta, se ha creído conveniente usar un motor de corriente continua en vez del motor de corriente alterna que posee la máquina, ya que al primero resulta más simple adaptarle un controlador de velocidad.

#### 3.1 Consideraciones para el diseño de las transmisiones

Para poder analizar las cargas que actuarán en las transmisiones debemos definir previamente los materiales que se mecanizarán con la fresadora vertical así como las herramientas de corte. También deberá establecerse las velocidades de avance y de corte para finalmente calcular las fuerzas de corte y

la potencia del accionamiento principal (husillo).

Después de estos cálculos podremos diseñar las transmisiones en los tres ejes.

Para aprovechar la versatilidad de las fresadoras verticales se dispone de varias herramientas de corte diferentes. Todas estas herramientas de fresar tienen los mismos principios fundamentales de trabajo. Definiremos algunos de los parámetros comúnmente utilizados en el fresado.

### 3.1.1 Definición de parámetros usados en el fresado

#### Velocidad de Corte ( $V_c$ )

Es el recorrido de un filo de la fresa en metros por minuto. Se selecciona en función del material a trabajar, espesor de viruta, y la duración que se pretenda dar a la herramienta.

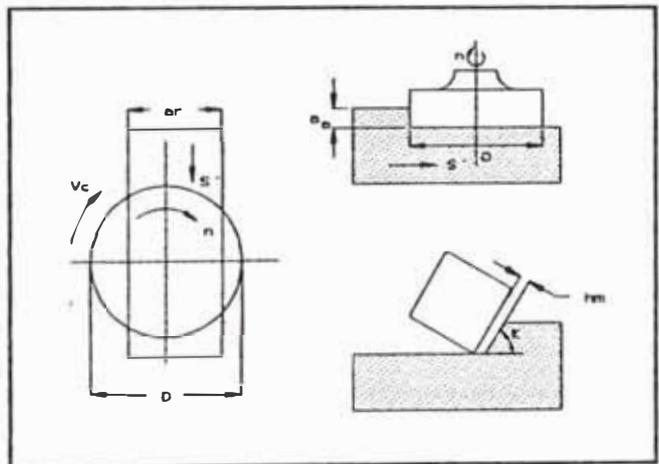


Figura 3-1

#### Número de Revoluciones de la Herramienta ( $n$ )

Este parámetro depende de la velocidad de corte admitido y del diámetro de la fresa; se halla de la siguiente relación:

$$n = \frac{VC * 1000}{\pi * D} \dots\dots\dots(3.1)$$

donde n = # de revoluciones de la fresa (RPM)

D = diámetro de la fresa (mm)

Vc = Velocidad de Corte (m/min)

Avance por Diente (Sz). Es el desplazamiento de la mesa (pieza) de la máquina, por cada diente que pasa de la fresa.

Velocidad de Avance (S'). Es el recorrido en mm que realiza la mesa fresadora, y con ella la pieza en un minuto. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S' = n * z * Sz \dots\dots\dots(3.2)$$

donde n = # revoluciones de la fresa (RPM)

z = # dientes de la fresa

Sz = Avance x diente (mm/diente). Este valor se obtiene de la tabla de velocidad de corte.

Profundidad Radial y Axial de pasada ( $a_r$ ,  $a_a$ ). Son respectivamente, la altura mecanizada por la fresa y la anchura de la parte fresada. Los siguientes gráficos muestran estos conceptos.

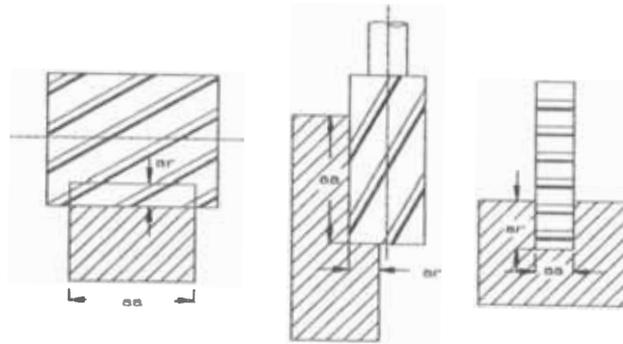


Figura 3-2

**Volumen de Viruta Arrancada (V).** Es la cantidad máxima de viruta que puede arrancar la fresa en un minuto. Está dado por:

$$V = a_r * a_a * S' \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

siendo  $a_r$  - Prof. radial de corte o pasada (mm).

$a_a$  - Prof. axial de corte o pasada (mm).

$S'$  - Avance de la mesa (mm/min)

**Angulo de Posición ( $\kappa$ ).** Este ángulo se mide desde la superficie mecanizada a la superficie generada por el filo de corte principal. Las fresas con  $\kappa=90^\circ$  se denominan fresas de planear y escuadrar y se usan cuando hay que fresar una superficie a  $90^\circ$ . Cuando se usa este ángulo la carga sobre la plaquita será el máximo para un avance elegido y la viruta desprendida puede ser un obstáculo. Hay una gran fuerza radial que tiende a crear vibraciones. En donde no sea necesario una exactitud de  $90^\circ$  es preferible usar un  $\kappa=88^\circ$ . El ángulo de posición  $\kappa=75^\circ$  es

común para todas las operaciones de fresado para todo uso. Para fresado en desbaste es conveniente  $\kappa=60^\circ$ .

Angulo de desprendimiento  $\nu_0$  se mide sobre un plano perpendicular al filo de corte principal.

Angulo de Inclinación  $\lambda_s$  es medido sobre un plano paralelo al filo de corte principal. En la siguiente figura se muestran los distintos ángulos descritos.

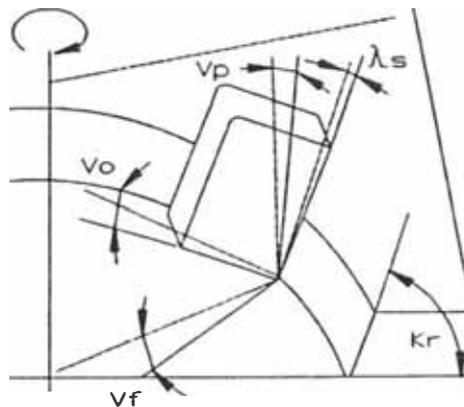


Figura 3-3

### 3.1.2 Materiales a trabajar

Debido al tamaño de la fresadora vertical a automatizar y a la pequeña potencia de corte, solo se mecanizarán los materiales que a continuación se mencionan. Las velocidades de corte admisible y el avance por diente se muestran también en la tabla siguiente.

Tabla 3-1 Velocidad de Corte para distintos materiales

Material	Fresa de acero rápido		
	Vc m/min	Sz mm/diente	
		Fresa cilíndrica	Fresa frontal
Fundición Gris GG-15	18-22	0.20	0.15
Fundición Gris GG-25	16-20	0.20	0.15
Fundición Maleable GTW-40	16-20	0.20	0.20
Acero St 50	20-24	0.20	0.15
Acero St 60	18-20	0.15	0.10
Acero St 70	12-16	0.10	0.10
Fundición de acero GS-45	16-20	0.15	0.15
Bronce	40-50	0.15	0.15
Latón	50-60	0.20	0.20
Aluminio	250-350	0.10	0.10
Fundición de aluminio	250-350	0.10	0.10
Materiales sintéticos	55-70	0.15	0.15

### 3.1.3 Herramientas a utilizar

La herramienta que se usa con mayor frecuencia en una fresadora vertical es la fresa de extremo

p l a n o .

Utilizaremos fresas de extremo plano de dos estrías (ver figura) de 6, 8, 10 y 12 mm de diámetro. Estas fresas son de corte centrado, lo cual significa que pueden hacer su propio agujero

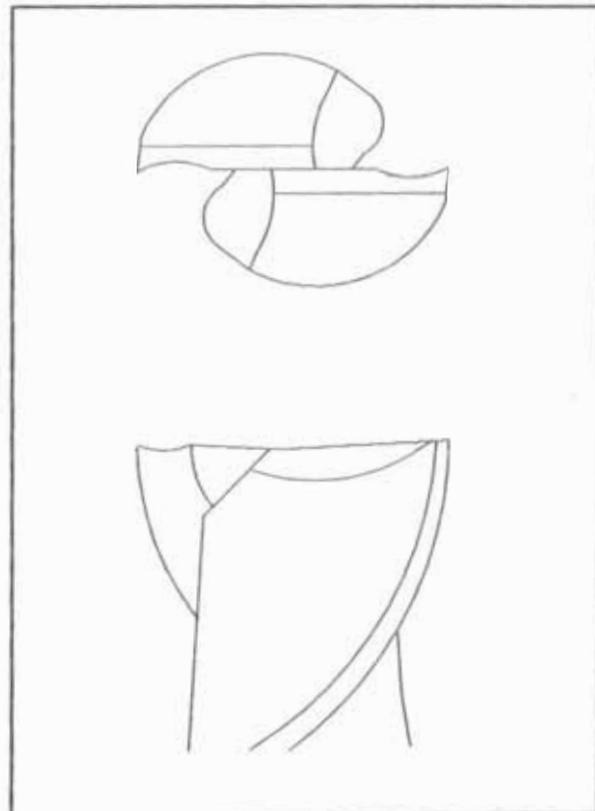


Figura 3-4

iniciador A esto se le llama corte de

penetración. Estas fresas son de acero rápido y son de costo relativamente bajo en comparación con las de puntas de carburo o con las fabricadas de carburo sólido. Estas últimas se usan para maquinar materiales de gran abrasividad o duros y tenaces, o en el fresado para producción.

### 3.1.4 Fuerzas de Corte

El arranque de viruta en el fresado se realiza en forma compleja ya que las fuerzas son variables y cíclicas porque el espesor de la viruta parte de cero hasta alcanzar su valor máximo. En el gráfico se muestra una fresa con un diente en posición de trabajo.

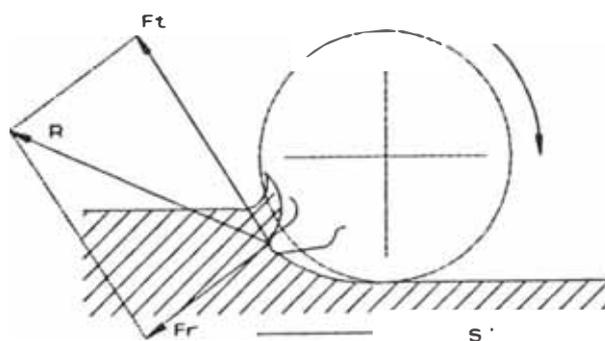


Figura 3-5

El esfuerzo  $R$  que tiene que ejercer el diente para arrancar la viruta se puede descomponer en:

$F_t$  - Fuerza tangencial o fuerza de corte.

$F_r$  - Fuerza radial

3.1.4.1 Cálculo de la fuerza de corte Ft

Esta fuerza tangente a la trayectoria que describe la periferia del diente se calcula mediante:

$$F_t = K_s \times S \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

siendo S - Sección de viruta en mm<sup>2</sup> = a<sub>a</sub> \* hm.

hm = espesor medio de la viruta.

Ks = Fuerza específica de corte

El valor de Ks está dado en tablas según el material y para un ángulo de desprendimiento  $\nu_o=0$  y un espesor de viruta medio hm=0.2 mm.

Tabla 3-2 Fuerza específica de corte y espesores de viruta

Tipos de Material	Dureza HB	Ks Kg/mm <sup>3</sup>	Espesor medio de virutas hm (mm)	Coef fh
Fundición maleable viruta corta viruta larga	110-145	220	0.05	1.50
	200-250	200	0.10	1.23
			0.15	1.10
Fundición gris poco dúctil muy dúctil	150-225	140	0.20	1.00
	200-300	180	0.25	0.94
			0.30	0.89
Fundición nodular ferrítica perlítica	125-200	150	0.35	0.85
	200-300	225	0.40	0.81
			0.45	0.79
Fundición en coquilla	40-60 HRC	475	0.50	0.76
			0.60	0.72
			0.70	0.69
Aleación de Aluminio	100	100	0.80	0.66
			0.90	0.64
			1.00	0.62

La fuerza Ks debe aumentar en 1.5% por cada grado que varía el ángulo de desprendimiento. Si aumenta el ángulo se reduce el Ks y viceversa.

Del mismo modo si el espesor de viruta es distinto a 0.2 mm debemos afectar el valor Ks por el coeficiente según la tabla anterior.

### 3.1.4.2 Cálculo de la Fuerza Radial Fr

El valor de esta fuerza es muy variable. Esta suele ser máxima cuando se inicia el corte debido a que el diente resbala sobre el material hasta que el espesor de viruta adquiere el suficiente grosor que facilita la incisión del diente. Este valor se calcula en aproximadamente 40% de Ft.

### 3.1.5 Cálculo del espesor medio de la viruta (hm)

Teniendo en consideración el tamaño y potencia de la fresadora a automatizar, el material más duro que se podrá mecanizar será la fundición nodular perlítica que tiene una dureza de 250 HB.

Para dicho material,  $K_s=203 \text{ Kg/mm}^2$ . Este valor no será afectado por el ángulo de desprendimiento ya que  $\nu_0=0^\circ$ , pero si estará afectado por el espesor.

Consideraremos como máxima profundidad de pasada  $1/4$  del diámetro de la fresa. En nuestro caso la fresa de mayor diámetro es 12 mm, por tanto:

$$a_r = 1/4 * 12 = 3 \text{ mm}$$

Debido a que el espesor de la viruta no es uniforme en el fresado, debe calcularse un espesor medio de viruta. Puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$h_m = \text{sen} \kappa * \frac{360}{\pi} * \frac{S_z * a_r}{\varphi * D} \dots\dots\dots(3.5)$$

donde  $\kappa$  = Angulo de posición de la fresa

$\varphi$  = Angulo que forma la superficie mecanizada con el centro de la fresa.

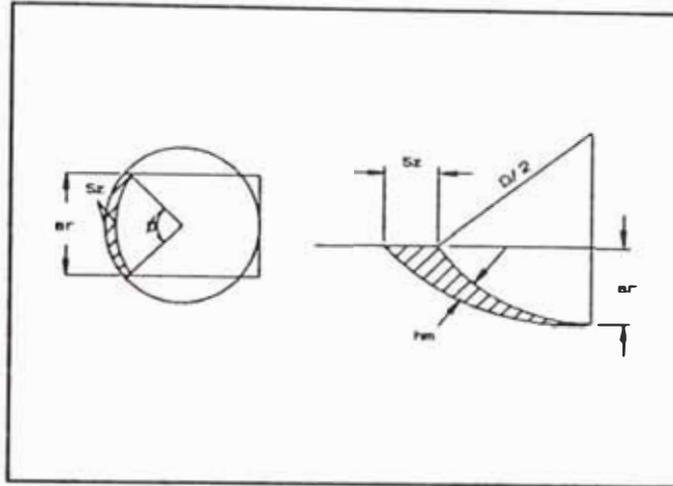


Figura 3-6

Para fresado periférico se emplea la siguiente fórmula:

$$h_m = S_z \sqrt{\frac{a_r}{D}} \dots\dots\dots(3.6)$$

Los valores de  $h_m$  están tabulados para mayor facilidad y en dicha tabla se considera también si el fresado es periférico o con la pieza situada al centro de la fresa. (Ver Apéndice D).

El avance por diente lo obtenemos de la tabla de Velocidades de Corte para fundición nodular.

$$S_z = 0.2 \text{ mm/diente}$$

De la tabla anterior, para  $a_r = 3 \text{ mm}$ ,  $D = 12 \text{ mm}$ ,  $\kappa = 90^\circ$  y fresado periférico obtenemos:

$$f_m = 0.48$$

Así:

$$hm = Sz * fm = 0.2 * 0.48 = 0.096 \text{ mm}$$

Corrección de  $K_s$  por espesor medio de viruta:

$$K_s = K_{sh} * fh = 203 * 1.23 = 249.7 \text{ Kg/mm}^2$$

Considerando  $a_a = 1 \text{ mm}$  reemplazamos en la fórmula (3.4), luego:

$$F_t = K_s * a_a * hm = 249.7 * 1 * 0.096$$

$$F_t = 23.97 \text{ Kg}$$

También  $F_r = 0.4 * F_t$

$$F_r = 9.59 \text{ Kg}$$

La fuerza resultante será:

$$R = 25.82 \text{ Kg}$$

### 3.2 Cálculo de Potencia del Husillo

La potencia de la máquina es a menudo el factor que limita el volumen de viruta arrancada. Es necesario conocer las relaciones entre la potencia requerida y los datos de corte.

La fuerza tangencial  $F_t$  es la que afecta en forma decisiva la potencia de la máquina.

$$P_C = K_s * a_r * a_a * S' = K_s * V \quad \dots (3.7)$$

donde:  $V$  = volumen de viruta arrancada.

Combinando fórmulas anteriormente mencionadas tendremos:

$$S' = S_z * z * \frac{V_C * 1000}{\pi * D} \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

Evaluamos para un fresado de aluminio ya que la velocidad de corte es comparativamente mucho mayor que

otros materiales. Asumimos para  $a_p$  un valor de 1 mm. El número de dientes de la fresa  $z=2$ .  $V_c=250$  m/min,  $D=12$  mm. Reemplazando en la ecuación (3.8) se obtiene:

$$S' = 1326.3 \text{ mm/min}$$

$K_s$  se obtiene de tablas y es  $K_s=123$ . De la fórmula (3.7) resulta:

$$P_c = 0.080 \text{ KW} \quad 0.107 \text{ HP}$$

La potencia del motor se calcula introduciendo el rendimiento de la máquina que para el fresado es aproximadamente 0.6.

$$P_m = P_c / 0.6 = 0.18 \text{ HP}$$

En la máquina se reemplazó el motor de corriente alterna por uno de corriente continua de la potencia anteriormente calculada y que, dicho sea de paso, es de una potencia muy próxima al del motor A.C. El cambio se hizo por el hecho de que es más sencillo diseñar un control de velocidad para un motor de C.C.

### 3.3 Diseño de la transmisión del Carro Transversal

Para realizar el desplazamiento del carro transversal (y también el longitudinal y vertical) se optó por el uso de motores de paso ya que permiten un posicionamiento preciso y el control puede ser hecho mediante una sistema de bucle abierto. Se trató en lo posible de modificar lo mínimo posible la fresadora vertical para que en un futuro pueda ser usado tanto manual como automáticamente.

La manivela fue reemplazada por una polea dentada y la transmisión del movimiento se hizo mediante una faja dentada. Se creyó conveniente el uso de la faja por ser fácilmente adaptable. En el caso del carro transversal, el motor de paso debe ir montado sobre este carro puesto que éste se desplaza a su vez sobre el carro longitudinal. A continuación se hará un cálculo teórico del torque requerido para mover el carro y posteriormente se indicarán las mediciones experimentales hechas en la fresadora.

### 3.3.1 Cálculo teórico del Torque del carro transversal

Ya que en estos cálculos intervienen velocidades y desplazamientos se hará uso del teorema de las fuerzas vivas, el cual indica que cuando una partícula se mueve bajo la acción de una fuerza, el trabajo de la fuerza es igual al cambio de energía cinética de la partícula. Así:

$$U_{1+2} = T_2 - T_1 \quad \dots(3.9)$$

donde:

$U_{1+2}$  = trabajo de las fuerzas ejercidas sobre la partícula

$T_1$  = Energía cinética inicial de la partícula

$T_2$  - Energía cinética final de la partícula

Considerando que el carro transversal empieza su movimiento estando detenido entonces  $T_1=0$ .

La energía cinética final se calcula mediante:

$$T_2 = \frac{m_L V_L^2}{2} + \frac{I_T \omega_T^2}{2} + \frac{I_M \omega_M^2}{2} \quad \dots(3.10)$$

donde :

$m_L$  = masa total del carro transversal = 4109 gr

$V_L$  = veloc. avance máxima del carro = 0.75 mm/s

$I_T$  = momento inercia tornillo + polea = 64 Kg/mm<sub>2</sub>

$I_M$  = momento inercia motor + polea = 27 Kg/mm<sub>2</sub>

$\omega_T$  = veloc. angular máxima tornillo = 4.7 rad/s

$\omega_M$  = veloc. angular máxima motor = 9.4 rad/s

Reemplazando obtenemos

$$T_2 = 1.914 \text{ N-mm}$$

Para calcular las fuerza externas sobre el carro tendremos:

$$U_{1-2} = M_M \alpha_M - M_{fT} \alpha_T \quad \dots(3.11)$$

siendo:

$M_M$  = torque del motor necesario para vencer la inercia y la fuerza actuante.

$\alpha_M$  = 0.314 = ángulo que gira el motor por cada paso

$M_{fT}$  = torque opositor por fricción y por la carga máxima.

$\alpha_T$  = 0.157 = ángulo que gira el tornillo/paso

Podemos hallar  $M_{fT}$  usando la siguiente fórmula:

$$M_{fT} = \frac{F \cdot D_m}{2} \times \frac{\tan \lambda + f \cdot \beta}{1 - f \cdot \beta \cdot \tan \lambda} + \frac{Dc \cdot fc \cdot F}{2} \quad \dots(3.12)$$

donde:

$F$  = fza.transversal arranque de viruta = 235 N

$D_m$  = diám. medio del tornillo del carro = 5.1 mm

$\lambda$  = ángulo de avance de la rosca = 0.03 rad

$f$  = coef. fricción entre tornillo y carro = 0.25

$f_c$  = coef. fricción entre tornillo y apoyo = 0.25

$D_c$  = diám. medio del apoyo del tornillo = 9.5 mm

$\beta = (1 + \cos^2 \lambda * \tan^2 \phi)^{\frac{1}{2}} = 2$

$\phi$  = ángulo entre flancos rosca de  $60^\circ = 1.05$  rad

Por lo tanto:  $M_{fT} = 603.36$  N-mm

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$M_H = (T_2 + M_{fT} \cdot a_T) / a_H$$

$$M_H = 301.88$$
 N-mm

### 3.3.2 Cálculo Experimental del torque transversal

Haciendo uso de un dinamómetro colocado en la periferia de la manivela se calculó el torque total necesario para desplazar el carro transversal. Debido a las irregularidades del tornillo del carro fue necesario medir el torque en varios puntos a lo largo del mismo. Se obtuvieron los siguientes resultados.

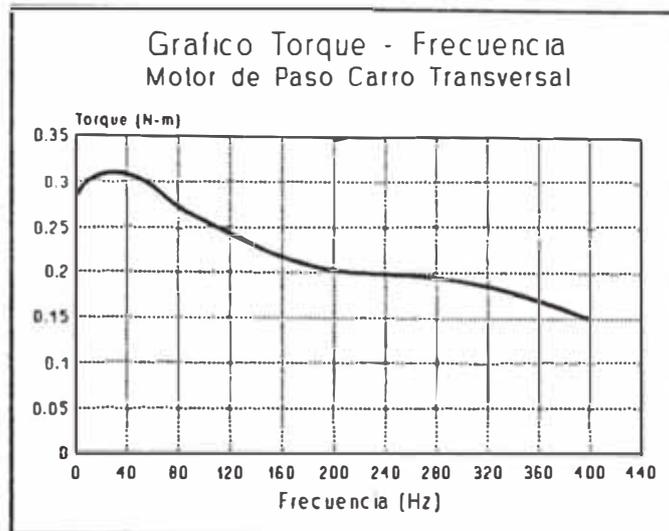


Figura 3-8

Por otro lado, la potencia a transmitir por el motor de pasos es:

$$P = T \times \omega = 0.17 \text{ Nm} \times 9.42 \text{ rad/s} = 0.0022 \text{ HP}$$

La potencia de diseño está dado por

$$P_D = f.s. \times P$$

siendo f.s. el factor de servicio. Para un servicio normal de maquinas herramientas se tiene  $f.s. = 1.7$ . Por tanto:

$$P_D = 0.00365 \text{ HP}$$

### Relación de Transmisión

Para vencer el torque del tornillo del carro transversal que es mayor al que puede vencer el motor, necesitamos tener una relación de transmisión mínima de:

$$\eta_t = 0.301 \text{ Nm} / 0.17 \text{ Nm} = 1.77$$

Ya que se trata de movimientos de precisión requerimos de una relación de transmisión que nos brinde un desplazamiento del carro

transversal lo mínimo posible. Si deseamos como mínimo desplazamiento 20 micras, entonces el ángulo que debe girar el tornillo sabiendo que por cada vuelta el carro se desplaza 1 mm, será:

$$\Delta \text{ Torn} = 360^\circ / 1 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm} = 7.2^\circ$$

Por otra parte, el ángulo que girará el motor de pasos estará de acuerdo al número de pulsos (NP) que se le envíe:

$$\Delta \text{ MP} = 1.8^\circ \times \text{NP}$$

Teniendo en cuenta que el número mínimo de pulsos que se le puede enviar al motor es de 3 pulsos por el diseño del circuito de control, haremos una tabla en la que se hallará la relación de transmisión posibles para posible números de pulsos para obtener 20 micras de desplazamiento del carro:

# Pulsos	$\Delta \text{ MP}$	$\eta_t$
3	5.4	0.75
	7.2	1.00
	9.0	1.25
	10.8	1.50
	12.6	1.75
	14.4	2.00
	16.2	2.25
9	18.0	2.50

Escogemos número de pulsos - 8 ya que la relación de transmisión de 2 es mayor que la relación de transmisión mínima hallada, y el número de pulsos es par.

### Velocidad de Avance

Con lo anterior hallamos la velocidad de avance del carro transversal.

$$\omega_{torn} \times r_{torn} = \omega_{MP} \times r_{MP} \rightarrow \frac{\omega_{torn}}{\omega_{MP}} = \frac{r_{MP}}{r_{torn}} = \frac{1}{\eta_t} \quad \dots (3.13)$$

$$\omega_{torn} = \frac{\omega_{MP}}{\eta_t} = \frac{9.42}{2} = 4.71 \text{ rad/s}$$

Sabiendo que el carro avanza 1 mm / rev = 1 mm /  $2\pi$  rad entonces:

$$V_{av} = 4.71 \text{ rad/s} \times 1 \text{ mm} / 2\pi \text{ rad} = 0.75 \text{ mm/seg}$$

### Selección del Paso de la Faja

Según la potencia de diseño obtenida hallaremos el paso de la faja de acuerdo al gráfico del catálogo de Gates (Ver Apéndice C). Se obtiene una faja XL de paso 0.2 pulgadas.

### Poleas, longitud y distancia entre centros.

En el mismo catálogo de Gates nos referimos a la tabla para la selección de la longitud de la faja de acuerdo a la relación de transmisión y a la distancia entre centros. Este último, por razones de espacio deberá estar comprendido entre 120 y 130 mm. De aquí obtenemos también el número de dientes y diámetro de paso de las poleas dentadas. Se quiere también que la polea conducida tenga un diámetro similar al de la manivela del carro transversal. La selección resulta en:

*Polea Motriz: 20 dientes, diámetro paso = 1.273"*

*Polea Conducida: 40 dientes, diám. paso = 2.546"*

*Longitud de la Faja · 15"*

*Distancia entre Centros : 4.46" - 113 mm.*

#### **Ancho de la Faja**

De las tablas del catálogo debemos hallar la potencia que puede transmitir la faja según el ancho, número de dientes de la polea motriz y velocidad de rotación del mismo. Obtenemos que para un ancho de faja 0.38" se puede transmitir 0.014 HP que es mayor a la potencia de diseño calculada anteriormente de 0.00365 HP.

### **3.4 Diseño de la Transmisión Longitudinal**

Se procedió de manera similar al diseño de la transmisión transversal.

#### **3.4.1 Cálculo Teórico del Torque del Carro Longitudinal**

Empleamos el teorema de fuerzas vivas como en el caso anterior. Los datos para la Ec.(3.10) son:

$m_l$  = masa total del carro transversal - 6958 gr

$V_l$  - veloc. avance máxima del carro - 1.0 mm/s

$I_T$  - momento inercia tornillo + polea = 98 Kg/mm<sup>2</sup>

$I_M$  = momento inercia motor + polea - 138 Kg/mm<sup>2</sup>

$\omega_T$  veloc. angular máxima tornillo - 6.28 rad/s

$\omega_M$  = veloc. angular máxima motor = 10.5 rad/s

Reemplazando en la ecuación obtenemos:

$$T_2 = 9.506 \text{ N-mm}$$

Para calcular las fuerzas externas sobre el carro usamos la ecuación (3.11) reemplazando los siguientes datos:

$M_M$  = torque del motor necesario para vencer la inercia y la fuerza actuante.

$\alpha_M$  = 0.058 = ángulo que gira el motor por cada paso

$M_{fT}$  = torque opositor por fricción y por la carga máxima.

$\alpha_T$  = 0.034 = ángulo que gira el tornillo/paso

Podemos hallar  $M_{fT}$  usando la fórmula (3.12) donde:

$F$  = fza. longitudinal por arranque viruta = 93.9N

$D_m$  = diámetro medio tornillo del carro - 11.1 mm  
= ángulo de avance de la rosca - 0.014 rad

$f$  = coef. fricción entre tornillo y carro - 0.25

$f_c$  = coef. fricción entre tornillo y apoyo = 0.25

$D_c$  = diám. medio del apoyo del tornillo - 13 mm

$$\beta = (1 + \cos^2 \lambda * \tan^2 \phi)^{\frac{1}{2}} = 2$$

$\phi$  - ángulo entre flancos de rosca  $60^\circ = 1.047$  rad

Por lo tanto:  $M_{fT} = 423.36 \text{ N-mm}$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$M_M = (T_2 + M_{fT} \cdot \alpha_T) / \alpha_M$$

$$M_M = 412.08 \text{ N-mm}$$

### 3.4.2 Cálculo Experimental del torque longitudinal

Al igual que en el caso anterior se midió el torque en varios puntos a lo largo del tornillo y se obtuvieron los siguientes resultados.

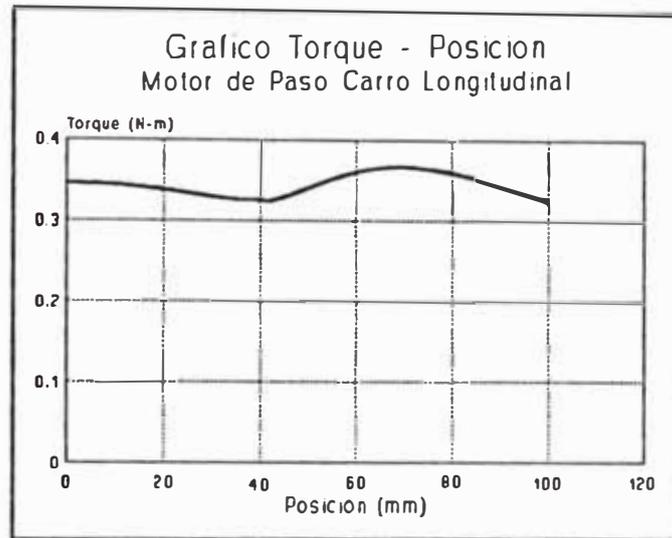


Figura 3-9

Del gráfico hallamos que el máximo torque será:

$$M_{\text{exp}} = 0.378 \text{ N-m}$$

### 3.4.3 Selección de la Faja

Calculamos la potencia a transmitir del motor al tornillo, y la relación de transmisión.

#### Potencia a transmitir

Anteriormente se halló el torque máximo a vencer  $T=0.412 \text{ Nm}$ . El motor de pasos, según la curva Frecuencia vs. Torque, podrá trabajar a una frecuencia máxima de 300 Hz, dando un torque de 0.322 N-m. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el ángulo de paso es  $2.0^\circ = 0.035 \text{ rad}$ , la velocidad angular máxima será:

$$\omega = 300 \text{ pulsos/seg} \times 0.035 \text{ rad/pulso}$$

$$\omega = 10.5 \text{ rad/seg}$$

La potencia a transmitir por el motor de pasos es:

$$P = T \times \omega = 0.322 \text{ Nm} \times 10.5 \text{ rad/s} = 0.00453 \text{ HP}$$

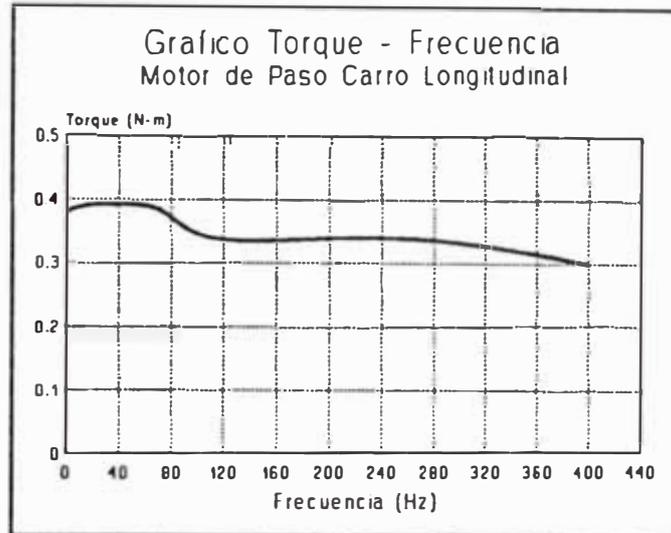


Figura 3-10

La potencia de diseño está dado por

$$P_0 = f.s. \times P$$

siendo f.s. = 1.7 (factor de servicio).

Por tanto:

$$P_0 = 0.0077 \text{ HP}$$

### Relación de Transmisión

Para vencer el torque del tornillo del carro longitudinal que es mayor al que puede vencer el motor, necesitamos tener una relación de transmisión mínima de:

$$\eta_t = 0.412 \text{ Nm} / 0.322 \text{ Nm} = 1.28$$

Ya que deseamos como mínimo desplazamiento 20 micras, entonces el ángulo que debe girar el

tornillo sabiendo que por cada vuelta el carro se desplaza 1 mm, será:

$$\Delta \text{ Torn} = 360^\circ / 1 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm} = 7.2^\circ$$

Por otra parte, el ángulo que girará el motor de pasos estará de acuerdo al número de pulsos (NP) que se le envíe:

$$\Delta \text{ MP} = 2.0^\circ \times \text{NP}$$

Recordando que el número mínimo de pulsos que se le puede enviar al motor es de 3 pulsos por el diseño del circuito de control, haremos una tabla en la que se hallará relaciones de transmisión posibles para posible numeros de pulsos.

# Pulsos	$\Delta \text{ MP}$	$\eta_t$
3	6.0	0.83
	8.0	1.11
	10.0	1.38
	12.0	1.67
7	14.0	1.94
8	16.0	2.22
9	18.0	2.50
10	20.0	2.77

Escogemos número de pulsos 6 ya que la relación de transmisión de 1.67 es mayor que la relación de transmisión mínima hallada, y el número de pulsos es par.

### Velocidad de Avance

Con lo anterior hallamos la velocidad de avance del carro longitudinal.

$$\Rightarrow \omega_{\text{torn}} = \frac{\omega_{MP}}{\eta_t} = \frac{10.47}{1.67} = 6.27 \text{ rad/s}$$

Sabiendo que el carro avanza 1 mm / rev = 1 mm /  $2\pi$  rad entonces:

$$V_{av} = 6.27 \text{ rad/s} \times 1 \text{ mm} / 2\pi \text{ rad} = 1.0 \text{ mm/seg}$$

### Selección del Paso de la Faja

Según la potencia de diseño obtenemos del catálogo de Gates una faja XL de paso 0.2 pulgadas.

Poleas, longitud y distancia entre centros.

En el mismo catálogo de Gates nos referimos a la tabla para la selección de la longitud de la faja. La distancia entre centros, por razones de espacio deberá estar comprendido entre 98 y 120 mm. De aquí obtenemos también el número de dientes y diámetro de paso de las poleas dentadas. Se quiere también que la polea conducida tenga un diámetro similar al de la manivela del carro longitudinal. La selección resulta en:

*Polea Motriz: 24 dientes, diámetro paso - 1.528"*

*Polea Conducida: 40 dientes, diám. paso - 2.546"*

*Longitud de la Faja : 15"*

*Distancia entre Centros : 4.27" - 108 mm*

### Ancho de la Faja

De las tablas del catálogo debemos hallar la potencia que puede transmitir la faja seleccionada. Obtenemos que para un ancho de faja = 0.38" se puede transmitir 0.014 HP que es mayor a la potencia de diseño calculada anteriormente de 0.0077 HP.

## 3.5 Diseño de la Transmisión Vertical

Se procedió de manera similar al diseño de la transmisión transversal.

### 3.5.1 Cálculo Teórico del Torque del Carro Vertical

Empleamos el teorema de fuerzas vivas como en el caso anterior. Los datos para la Ec.(3.10) son:

$m_l$  = masa total del carro vertical - 21980 gr

$V_l$  - veloc. avance máxima del carro - 0.75 mm/s

$I_f$  = momento inercia tornillo+polea - 343 Kg/mm<sup>2</sup>

$I_M$  - momento inercia motor+polea - 134 Kg/mm<sup>2</sup>

$\omega_f$  = veloc. angular máxima tornillo - 1.57 rad/s

$\omega_M$  = veloc. angular máxima del motor= 6.28 rad/s

Reemplazando en la ecuación obtenemos:

$$T_2 = 3.079 \text{ N-mm}$$

Para calcular las fuerzas externas sobre el carro usamos la ecuación (3.11) reemplazando los siguientes datos:

$M_M$  = torque del motor necesario para vencer la

inercia y la fuerza actuante.

$\alpha_H = 0.0314$  = ángulo que gira el motor por paso

$M_{fT}$  - torque opositor por fricción y por la carga máxima.

$\alpha_T = 0.0078$  - ángulo que gira el tornillo/paso

Podemos hallar  $M_{fT}$  usando la fórmula (3.12)

donde:

$F$  = fza. vertical por peso del cabezal = 215N

$D_m$  = diám. medio tornillo del carro = 18.26 mm

$\lambda$  = ángulo de avance de la rosca = 0.034 rad

$f$  = coef. fricción entre tornillo y carro = 0.25

$f_c$  = coef. fricción entre tornillo y apoyo = 0.25

$D_c$  = diámetro medio apoyo del tornillo = 20 mm

$\beta = (1 + \cos^2 \lambda * \tan^2 \phi)^{\frac{1}{2}} - 2$

$\phi$  = ángulo entre flancos de rosca  $60^\circ = 1.05$  rad

Por lo tanto:  $M_{fT} = 1609.51$  N-mm

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$M_H = (T_2 + M_{fT} \cdot \alpha_T) / \alpha_H$$

$$M_H = 500.442$$
 N-mm

### 3.5.2 Cálculo Experimental del torque vertical

Al igual que en el caso anterior se midió el torque en varios puntos a lo largo del tornillo y se obtuvieron los siguientes resultados.

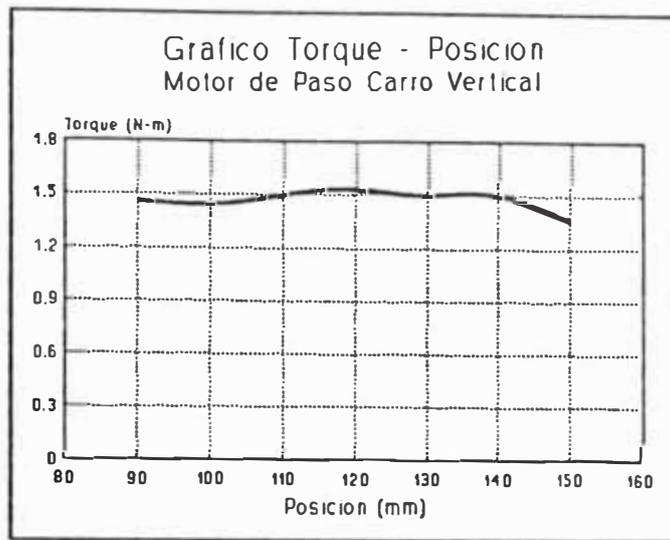


Figura 3-11

Del gráfico hallamos que el máximo torque será:

$$M_{\mu} \text{ exp} = 1.551 \text{ N-m}$$

### 3.5.3 Selección de la Faja

Calculamos la potencia a transmitir del motor al tornillo, y la relación de transmisión.

Potencia a transmitir

Anteriormente se halló el torque máximo a vencer  $T=1.551 \text{ Nm}$ . El motor de pasos, según la curva Frecuencia vs. Torque, podrá trabajar a una frecuencia máxima de 200 Hz, dando un torque de 0.395 N-m. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el ángulo de paso es  $1.8^\circ = 0.0314 \text{ rad}$ . la velocidad angular máxima será:

$$\omega = 200 \text{ pulsos/seg} \times 0.0314 \text{ rad/pulso}$$

$$\omega = 6.283 \text{ rad/seg}$$

La potencia a transmitir por el motor de pasos es:

$$P = T \times \omega = 0.395 \text{ Nm} \times 6.283 \text{ rad/s} = 0.003327 \text{ HP}$$

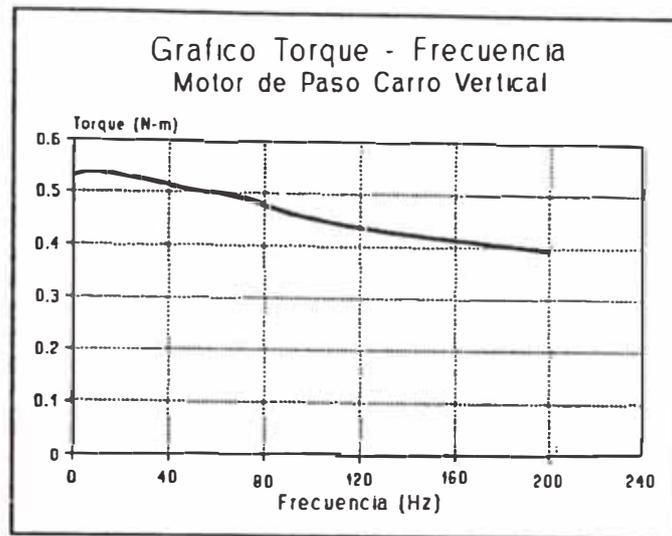


Figura 3-12

La potencia de diseño está dado por

$$P_D = f.s. \times P$$

siendo  $f.s. = 1.7$  (factor de servicio). Por tanto:

$$P_D = 0.005656 \text{ HP}$$

### Relación de Transmisión

Para vencer el torque del tornillo del carro vertical que es mayor al que puede vencer el motor, necesitamos tener una relación de transmisión mínima de:

$$\eta_t = 1.551 \text{ Nm} / 0.395 \text{ Nm} = 3.92$$

Ya que deseamos como mínimo desplazamiento 25 micras, entonces el ángulo que debe girar el tornillo sabiendo que por cada vuelta el carro se desplaza 2 mm, será:

$$\Delta \text{ Torn} = 360^\circ / 2\text{mm} \times 0.025\text{mm} = 4.5^\circ$$

Por otra parte, el ángulo que girará el motor de

pasos estará de acuerdo al número de pulsos (NP) que se le envíe:

$$\Delta MP = 1.8^\circ \times NP$$

Recordando que el número mínimo de pulsos que se le puede enviar al motor es de 3 pulsos por el diseño del circuito de control, haremos una tabla en la que se hallará relaciones de transmisión posibles para posible numeros de pulsos.

# Pulsos	$\Delta MP$	$\eta_t$
3	5.4	1.20
4	7.2	1.60
	9.0	2.00
6	10.8	2.40
	12.6	2.80
8	14.4	3.20
	16.2	3.60
10	18.0	4.00

Escogemos número de pulsos 10 ya que la relación de transmisión de 4 es mayor que la relación de transmisión mínima hallada, y el número de pulsos es par.

#### Velocidad de Avance

Con lo anterior hallamos la velocidad de avance del carro vertical.

$$\rightarrow \omega_{\text{tozn}} = \frac{\omega_{MP}}{\eta_t} = \frac{9.42}{4.0} = 2.355 \text{ rad/s}$$

Sabiendo que el carro avanza 2 mm / rev - 2 mm / 2 $\pi$  rad entonces:

$$V_{\text{av}} = 2.355 \text{ rad/s} \times 2 \text{ mm} / 2\pi \text{ rad} = 0.75 \text{ mm/seg}$$

### Selección del Paso de la Faja

Según la potencia de diseño obtenemos del catálogo de Gates una faja XL de paso 0.2 pulgadas.

### Poleas, longitud y distancia entre centros.

En el mismo catálogo de Gates nos referimos a la tabla para la selección de la longitud de la faja. La distancia entre centros, por razones de espacio deberá estar comprendido entre 78 y 100 mm. De aquí obtenemos también el número de dientes y diámetro de paso de las poleas dentadas. Se quiere también que la polea conducida tenga un diámetro similar al de la manivela del carro vertical. La selección resulta en:

*Polea Motriz: 15 dientes, diámetro paso - 0.955"*

*Polea Conducida: 60 dientes, diám. paso - 3.280"*

*Longitud de la Faja : 15"*

*Distancia entre Centros : 3.45" - 88 mm.*

### Ancho de la Faja

De las tablas del catálogo debemos hallar la potencia que puede transmitir la faja seleccionada. Obtenemos que para un ancho de faja = 0.38" se puede transmitir 0.014 HP que es mayor a la potencia de diseño calculada anteriormente de 0.005656 HP.

## CAPITULO 4

### DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control será el encargado de controlar el funcionamiento de los distintos dispositivos de accionamiento y de recibir señales provenientes de la máquina para procesarlas y actuar de acuerdo a un programa. En la figura siguiente se muestra un diagrama de bloques de los circuitos electrónicos utilizados en este sistema.

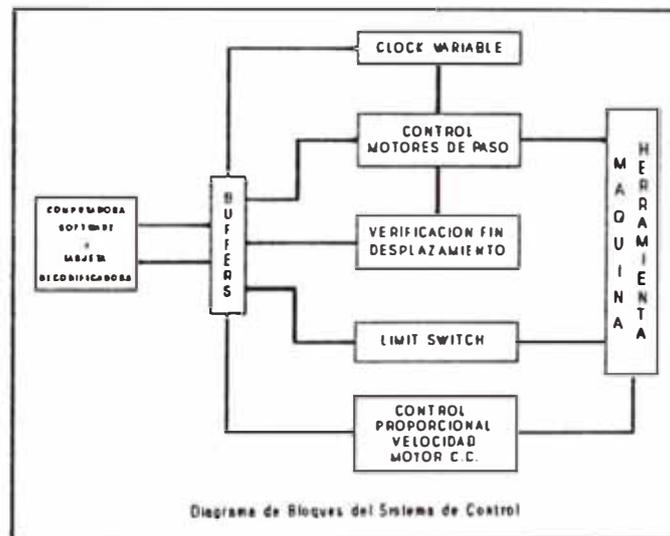


Figura 4-1

Dentro de los circuitos electrónicos tendremos aquellos que gobernarán los motores de paso, verificarán el fin de desplazamiento, la velocidad el motor de corriente continua que hará girar la herramienta y los limitadores de fines de carrera. Ya que el control será realizado por una computadora, se necesitará direccionar las señales del

computador a cada uno de los circuitos del sistema. Estas señales deberán ser transmitidas por los puertos de la computadora. En este caso se utilizó una tarjeta decodificadora que permite un acceso a 8 distintas direcciones, y leer o escribir 8 bits de datos en cada una de ellas con bastante facilidad.

A continuación se procederá a explicar la función de cada uno de ellos.

#### 4.1 Circuito de Direccionamiento E/S de Datos

##### 4.1.1 Tarjeta Decodificadora

Es a través de esta tarjeta que podremos programar o escribir a los distintos circuitos electrónicos del sistema, así como recibir información proveniente de ellos. Dicha tarjeta posibilita el acceso a ocho distintas direcciones de puertos y tiene un bus de datos de 8 bits. Mediante el lenguaje Pascal podemos acceder a la interfase utilizando la función PORT [XXX] en donde XXX será la dirección del puerto correspondiente. Así, si queremos escribir un dato en el puerto con dirección \$300 (\$=hexadecimal) la línea de programa será:

```
PORT [$300] := Byte;
```

En cambio si queremos leer un dato de dicho puerto escribiremos: Byte := PORT [\$300]

Las direcciones que usaremos en esta tarjeta serán:

Puerto	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
Dirección	\$300	\$304	\$308	\$30C	\$310	\$314	\$318	\$31C

A través de esta tarjeta también obtenemos señales de Read/Write (Escritura/Lectura) provenientes del computador, así como dos bits del bus de direcciones A0 y A1. Usando estos últimos bits en forma conveniente, es posible obtener el equivalente a 32 puertos distintos de esta interfase. Para nuestro propósito se utilizarán estos bits para la programación de los PIT que se explicarán más adelante.

La tarjeta es colocada en uno de los slots de expansión del computador.

#### **4.1.2 Circuito de Memorias**

Con frecuencia deberemos enviar un dato a uno de los circuitos del sistema e inmediatamente tendremos que cambiar de dirección para enviar un dato distinto a otro circuito.

Sin embargo, el primer dato debe memorizarse de alguna manera para que dicho circuito siga cumpliendo su labor correctamente.

Es por esto que se diseñó un circuito de memorias que permitirán almacenar los datos para cada uno de los circuitos del sistema.

Para esto se usaron los Circuitos Integrados CI 74373 que son Básculas Octales Tipo D. (Octal D-Type Transparent Latches). Estos registro permiten almacenar 8 bits de datos. Para comprender el funcionamiento de este CI debemos empezar mencionando

que los elementos básicos de memoria son los denominados básculas o latches (cerrojo, en inglés), a partir de los cuales se consiguen elementos de memoria más complejos y sofisticados.

Un tipo de báscula es la llamada Báscula Tipo-D la cual es mostrada en el siguiente esquema.

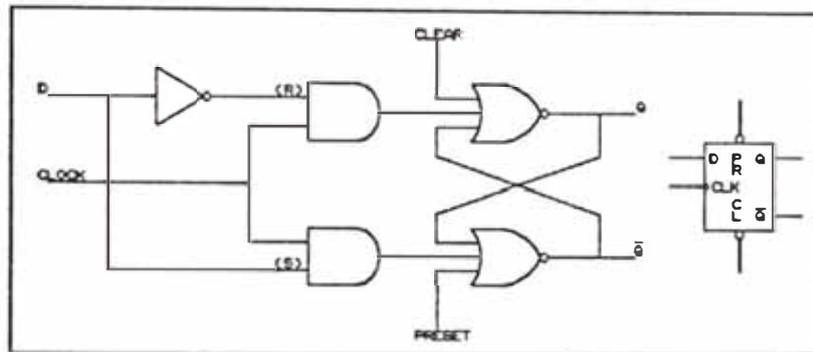


Figura 4-2

En esta báscula solo existe una entrada D y usando el inversor logramos que las entradas R y S siempre sean opuestas. El principio de funcionamiento es el siguiente: mientras la señal del reloj se encuentre en un nivel lógico alto, la salida Q seguirá a la entrada D. Cuando la señal de reloj baja, la salida mantendrá el ultimo nivel de D. A veces, esta señal de reloj recibe el nombre de Enable.

El CI 74373 se compone de 8 de estas básculas tipo D, por lo tanto podrán almacenar 8 bits de datos. También posee una entrada de Control de Salida (Output Control = OC) que será usado para fijar las 8 salidas en estado lógico normal o en un estado de alta impedancia (Salidas de tres estados). En este último estado las salidas no afectarán el bus de datos de la

tarjeta decodificadora. El diagrama del circuito se muestra en el apéndice B.

Cuando se desee escribir nuevos datos habilitaremos el CI, o sea, Enable(G) = nivel alto e inmediatamente leerá el bus de datos de la tarjeta decodificadora. Una vez cargado el dato lo deshabilitaremos (G=nivel bajo) y el dato quedará almacenado hasta una nueva llamada. Este valor guardado será utilizado por el circuito que se encuentre enlazado con este CI.

Para realizar lecturas, las señales de la máquina serán las que se carguen al latch y éstas se mantendrán para su posterior lectura por parte de la tarjeta decodificadora.

El sistema de control consta de 5 CI 74373 para los siguientes propósitos :

---

No. Latch	Read/Write	Puerto	Propósito
1	Write	Y3	Programar inicio y dirección de desplazamiento de los carros
2	Read	Y4	Recibir señales fin de desplazamiento
3	Read	Y5	Recibir señales de micro-switch de fines de carrera
4	Write	Y6	Fijar el reloj base para los PIT
5	Write	Y7	Fijar velocidad de motor C.C.

#### 4.2 Circuito de Clock Variable

Los motores de paso están gobernados básicamente por un CI llamado Programmable Interval Timer (PIT) que

fija la frecuencia y el número de pulsos que deben girar, y un secuenciador (el CI 74194) que realiza la conmutación de las bobinas. Los PIT, que se explicarán con detalle posteriormente, calculan la frecuencia en base a un reloj de entrada que está dado precisamente por el circuito de Clock Variable. Anteriormente se mencionó que es preferible que un motor de paso inicie su giro con una aceleración moderada para evitar la pérdida de pasos. Por esta razón será el clock variable el que irá incrementado gradualmente el valor del clock base de los PIT para producir la aceleración deseada.

Este circuito funciona en base al CI XR-2206. Este CI puede generar ondas de formas senoidales, cuadradas, triangulares, de rampa y pulsos de alta calidad en un rango muy amplio de frecuencias. El XR-2206 tiene muchas aplicaciones útiles y puede ser usado como un simple generador de formas de onda o como generador de funciones complejas con una variedad de modulaciones.

La frecuencia de oscilación ( $F_o$ ) es determinada por el capacitor de control externo a través de los pines 5 y 6 según se muestra en el diagrama en el apéndice B, y por una resistencia de temporización conectada a cualquiera de los pines 7 u 8. La frecuencia está dado por  $F_o = 1 / RC$ .

El V.C.O. (Oscilador Controlado por Voltaje) del circuito produce dos formas de onda simultáneamente.

Una de estas es una rampa lineal, la cual es alimentada a un multiplicador interno y al bloque conformador de la señal seno, y la otra es una forma rectangular.

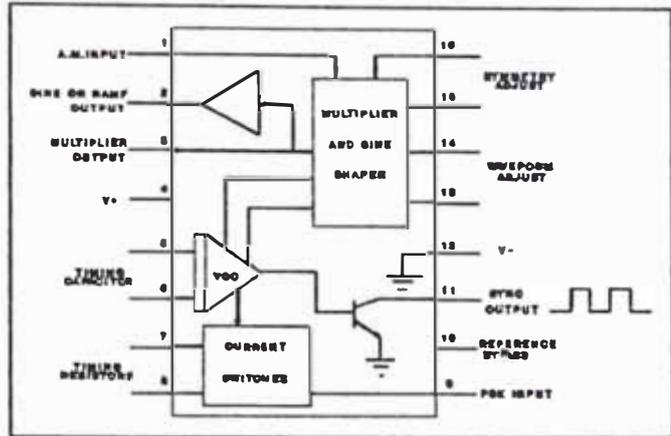


Figura 4-3

Lo que necesitamos en este diseño es la generación de una onda cuadrada con un rango variable de frecuencia de 15 a 1.

Es decir, si se diseña el circuito para generar un clock de una frecuencia máxima de 150 KHz, podremos variar esta señal en el rango de 10 KHz a 150 KHz. A través del pin 7 se variará la tensión para lograr la variación de la frecuencia de la onda cuadrada.

El diagrama de bloques de este circuito completo es:

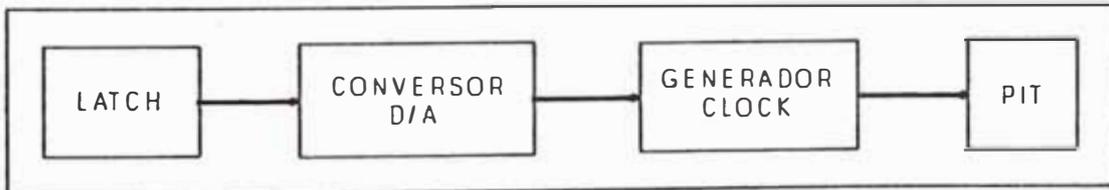


Figura 4-4

El latch tendrá un dato digital proporcional a la frecuencia del clock a generar. Sin embargo, el XR-2206 necesita como señal de entrada una señal analógica de tensión; por esta razón debemos utilizar un conversor Digital/Analógico. El conversor D/A es un dispositivo que recibe una información digital en

forma de palabras de 8 bits, y proporciona en su salida una información analógica, ya sea una señal de tensión o una de corriente. En nuestro caso, a cada uno de los 256 valores posibles de entrada corresponderá un valor de tensión comprendido entre 0 y 10 voltios.

Finalmente, el CI XR-2206 se encargará de generar una onda cuadrada de la frecuencia pedida y enviará esta señal a los 3 PIT que gobiernan, a su vez, a cada uno de los motores de paso.

#### **4.3 Control de los Motores de Paso (Stepper Motors)**

Como se mencionó previamente, la fresadora tiene que desplazar tres carros simultáneamente: el carro transversal, el longitudinal y el vertical. Esto se logra colocando un motor de paso en cada carro. El control debe ser capaz de mover coordinada y simultáneamente los 3 motores para lograr el desplazamiento en los tres ejes.

Se dijo también que los motores de paso giran de acuerdo a la conmutación de bobinas energizadas. Por lo tanto, empezaremos explicando cuál debe ser la secuencia de energización de las bobinas del motor y cómo se realiza.

##### **4.3.1 Circuito Secuenciador**

En la tabla muestra la secuencia de energizado en un motor de paso y el diagrama de tiempos:

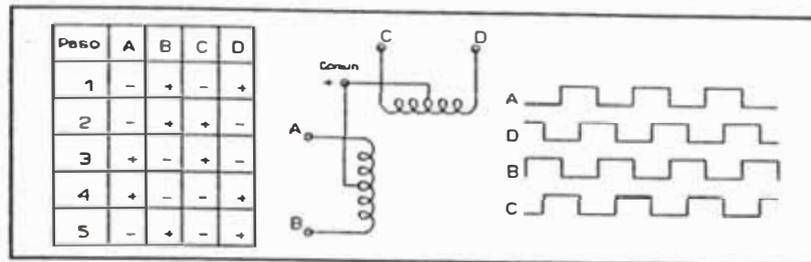


Figura 4-5

Al observar la tabla vemos que en cada secuencia hay dos bobinas que están energizadas (+) y hay 4 posibles combinaciones antes de repetir la secuencia. También se aprecia en el diagrama de tiempos que si se dispone el orden de las bobinas según se muestra existe un desplazamiento hacia la derecha de las bobinas energizadas. Si logramos hacer un circuito que mande una señal a cada bobina cuando le corresponda habremos logrado hacer girar al motor de paso.

Esto lo lograremos usando el CI 74194 que es un Registro de desplazamiento universal bidireccional de 4 bits. Este registro permite el desplazamiento hacia la derecha o hacia la izquierda de datos de 4 bits. Uno de los modos de operación de este registro es el de carga paralela. En este modo cargaremos inicialmente los 4 bits correspondiente a cada una de las bobinas que en nuestro caso será [ 1 1 0 0 ] (1=bob. energizada, 0=bob. desenergizada). Dependiendo del sentido de giro del motor haremos que el registro desplace los bits hacia

la izquierda o derecha.

Hay que tener presente que al realizar un desplazamiento de los bits siempre el primero quedará en estado indeterminado. Es por esto que el CI dispone de dos pines (DSR=Dato desplazamiento derecha, DSL=Dato desplazamiento izquierda) los cuales almacenarán el estado que se quiere para el primer bit, ya sea si se desplaza a la izquierda o a la derecha respectivamente. En nuestro caso debemos hacer que el último bit pase a ser el primero para que se repita la secuencia de energización, y por tanto conectaremos la salida del último bit al pin correspondiente (DSR o DSL).

Los desplazamientos se realizarán en forma sincronizada con el flanco ascendente del impulso del reloj. Este reloj estará dado por el PIT correspondiente.

#### 4.3.2 Contador/temporizador programable

El CI 8253 Programmable Interval Timer PIT es un dispositivo contador/temporizador programable. Consta de 3 contadores independientes de 16 bits cada uno, y pueden ser controlados por señales de reloj de hasta 2.6 MHz.

En el sistema diseñado se usó un CI 8253-5 para cada motor de paso y se utilizaron dos contadores de cada PIT.

El diagrama de bloques del 8253-5 es el siguiente:

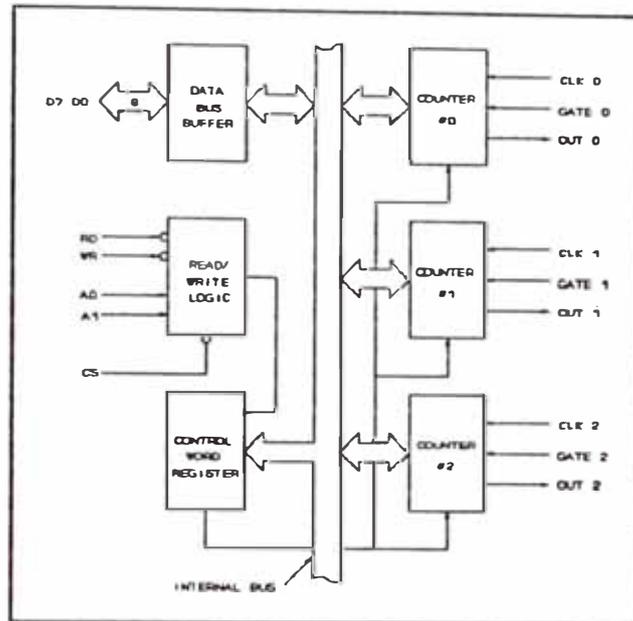


Figura 4-6

Los buffers de 8 bits, bidireccionales y de tres estados permiten conectar el 8253 al bus de datos. Tiene tres funciones básicas:

1. Programar los modos del 8253.
2. Cargar los registro del contador.
3. Lectura de los valores del contador.

Las señales de Read/Write permiten entradas o salidas del o hacia el bus, siempre y cuando esté activado el 8253 mediante CS (Chip select). Las direcciones Y0, Y1 y Y2 de la tarjeta decodificadora activarán las señales CS de cada uno de los 3 PIT del sistema correspondiente a cada motor de paso.

Las entradas A0 y A1 están conectadas al bus de direcciones de la tarjeta decodificadora. Su función es seleccionar uno de los tres

contadores a ser operado y direccionar el Registro de Control para el modo seleccionado.

El Registro de Control es un dato que controla el modo de operación de cada contador, selecciona si la cuenta es binaria o decimal, y la forma de cargar el valor a cada contador.

En el diagrama de bloques se observa que cada contador tiene dos entradas (CLK y GATE) y una salida (OUT). La entrada de CLOCK es al que se refiere el contador al hacer la cuenta, o para calcular la frecuencia con que generará señales. Dependiendo del nivel lógico en que se encuentre la señal de GATE, la cuenta de pulsos se detendrá o continuará, y lo mismo sucederá con la generación de señales.

A través de OUTPUT se indicará el fin de la cuenta en caso de ser usado como contador, o se enviará las señales generadas por los contadores, según el modo de operación en que se encuentre el contador.

Cada uno de los contadores tiene 6 modos de operación.

Modo 0 : Interrupción al terminar cuenta.

Modo 1 : Disparo programable.

Modo 2 : Generador de señales

Modo 3 : Generador de onda cuadrada.

Modo 4 : Disparo de pulso por software

Modo 5 : Disparo de pulso por hardware.

Mediante software y direccionando a través de la tarjeta decodificadora podemos programar cada uno de estos contadores al modo de operación requerido.

Explicaremos los modos 0 y 3 que son los usados en el control de los motores de paso.

Modo 0 : La señal de salida estará inicialmente en un nivel lógico bajo. Luego de cargar el valor que se ha de contar, la salida permanecerá en nivel bajo hasta que se haya terminado la cuenta. Al ocurrir esto, la salida pasará a nivel alto y permanecerá así hasta que se re programe nuevamente el contador.

Este modo de operación lo utilizaremos para contar el número de pulsos que debe girar el motor de paso y detenerlo al terminar la cuenta.

Modo 3 : En este modo se genera una señal de onda cuadrada que tendrá una frecuencia igual a la frecuencia base dividido entre el valor programado que es un dato de 16 bits. Se usará para fijar la frecuencia con que debe enviarse los pulsos al motor de pasos para lograr la velocidad de giro deseada.

#### 4.3.3 Circuito amplificador de potencia de los Motores de Paso

Vimos anteriormente que el circuito secuenciador

produce las señales que harán girar el motor. Sin embargo estas señales que provienen del CI 74194 es de 5 voltios y puede entregar solo unos cuantos miliamperios. Por tanto, para enviar estas señales al motor de paso debe haber de por medio un circuito que amplifique estas señales, además de entregar 12 voltios a las bobinas. Para esto conectaremos un transistor Darlington BD681 a cada bobina tal como se muestra en el esquema.

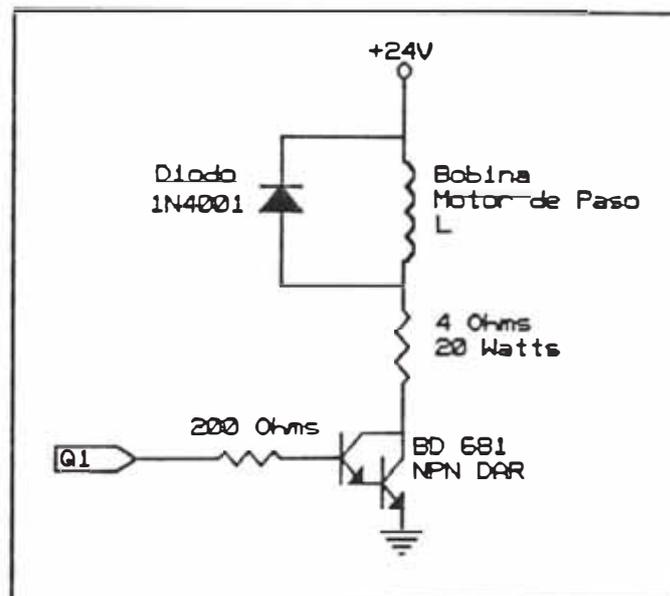


Figura 4-7

Este transistor va a actuar como un switch; cuando la señal Q se encuentre en un nivel lógico alto, el transistor cerrará el circuito y permitirá alimentar a la bobina del motor y la resistencia serie con la fuente externa de 24 voltios. Cuando la señal sea baja entonces el transistor abrirá el circuito y no habrá corriente en la bobina. La resistencia en la

base del transistor protege al CI. El diodo que se encuentra en paralelo a la bobina sirve para suprimir los picos de corriente que se pudiesen producir durante el funcionamiento. Si hubiera un pico de corriente esta regresará a través del diodo hacia la fuente.

También está conectada una resistencia en serie con la bobina. Se explicó que debíamos tratar por algún medio de que la corriente en la bobina aumente rápidamente para que el motor tenga un mayor torque. Uno de estos métodos era el del circuito resistivo, en el que se reduce la relación  $L/R$  del motor. En este caso hemos reducido la relación  $L/R$  a  $L/2R$ , siendo  $L$  y  $R$  la inductancia y resistencia de cada bobina del motor de paso respectivamente. Por un simple divisor de tensión se encuentra que la caída de tensión en la resistencia en serie es de 12 voltios y en la bobina del motor también 12 voltios, tensión a la cual se hicieron las pruebas con los motores de paso.

#### **4.3.4 Fin de Desplazamiento de los carros**

El computador debe saber de alguna manera que el desplazamiento programado a cada carro ha terminado antes de programar un nuevo desplazamiento. Para esto el PIT tiene una señal de salida que indica el momento en que ha

concluido la cuenta del número de pulsos programado (Modo 0) Por lo tanto, inmediatamente después de programar los PIT, se ejecuta una rutina en el programa que recibe a través de un latch (dirección Y4) las señales de los tres PIT (uno por cada motor) indicando el fin del desplazamiento. Solo se volverá a reprogramar un nuevo desplazamiento hasta que los tres PIT envíen la señal correspondiente.

#### 4.4 Circuito de Limit Switch

Uno de los latches (dirección Y5) se encarga de recibir las señales de los micro-switch que indican si alguno de los tres carros ha alcanzado un extremo de sus desplazamiento. Estos micro-switch devolverán solo dos estados: un nivel lógico alto indicando que el carro ha llegado a un extremo, y un nivel lógico bajo cuando el carro se encuentra en una posición permitida. Si alguno de estos switches se activara entonces se generará una interrupción en el programa, e inmediatamente se reprogramará los tres PIT para detener a los motores de paso (frecuencia y número de pulsos igual a cero), y también se fijará el valor de la velocidad de giro de la herramienta en cero.

#### 4.5 Control Proporcional de Velocidad

La velocidad de giro de la herramienta debería mantenerse a la velocidad programada por el

computador. Pero esto no sucede ya que debido a la fricción entre la herramienta de corte y la pieza se producirá una disminución en la velocidad de giro. Para mantener esta velocidad lo más cerca a lo deseado es que se diseña el control de velocidad para el motor de corriente continua.

El diagrama de bloques de este controlador es como se muestra a continuación :

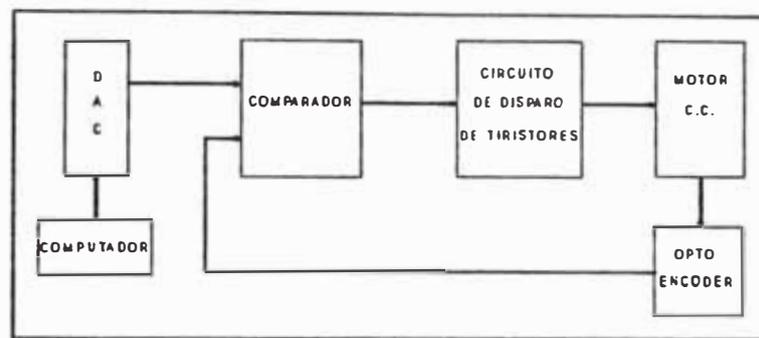


Figura 4-8

Anteriormente se explicó la función de conversor digital - analógico. En este caso el DAC tiene la dirección Y7 según la tabla anterior, y convierte a una señal de tensión los valores numéricos que se le envíen de 0 a 255. Estos límites corresponden respectivamente a la mínima y máxima velocidad del motor de corriente continua que en nuestro caso se fijará en 0 RPM como mínimo y 1200 RPM como máximo.

La señal de tensión generada (Set Point) es enviada al comparador el cual compara este dato con la señal recibida del opto encoder. Este último indica la velocidad real del motor a la que se encuentra girando. La diferencia entre el Set Point (SP) y el valor medido (VM) del opto encoder nos da el error

$$E = SP - VM \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

Este error es amplificado e invertido y se obtiene un valor  $-KxE$  donde  $K$  es la ganancia y mediante este parámetro podemos variar la banda proporcional del control de velocidad. La banda proporcional es el porcentaje del rango total del controlador en el cual el valor medido cambiaría de orden de producir que el dispositivo de corrección cambie en un 100%.

Ya que es posible que el error sea positivo o negativo entonces debemos sumar una tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) a la señal del error para asegurarnos que en cualquier caso el valor será positivo. Esto es necesario para el circuito de tiristores, por tanto:

$$V_{control} = V_{ref} - KxE \quad K x (VM - SP) + V_{ref} \dots(4.2)$$

El circuito de disparo de tiristores está gobernado por el TCA-780, el cual es un integrado de 16 pines que sirve para aplicaciones del control del ángulo de disparo de tiristores y triacs.

De la figura adjunta vemos que el CI genera una rampa cuya amplitud puede ser controlada por un potenciómetro (Pin 9). El comparador de control compara la tensión de la rampa con la tensión de control ( $V_{control}$ ) y cuando estas son iguales envía pulsos al Pin 15 (pulsos positivos por cada semiciclo positivo de la tensión de sincronismo), y al pin 14 (pulsos positivos por cada ciclo negativo de tensión de sincronismo) y están desfasados entre sí  $180^\circ$ .

La tensión de sincronismo es una tensión alterna de referencia que está en sincronismo con la tensión alterna que alimenta al

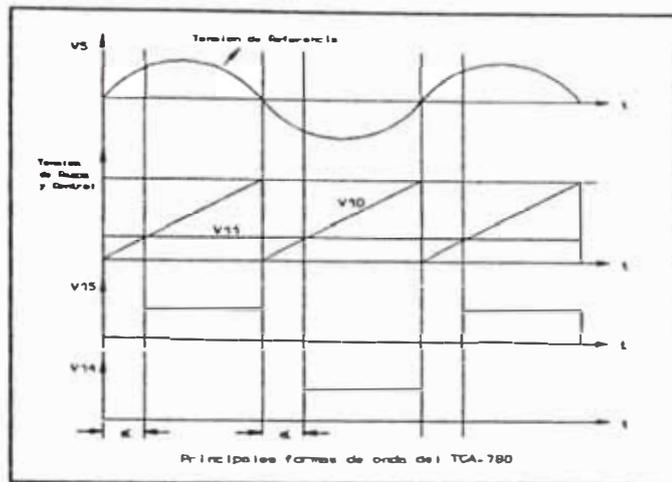


Figura 4-9

motor. (Ver apéndice B del circuito de disparo). Las señales de los pines 14 y 15 se suman y dispararán al tiristor que alimentará al motor de corriente continua dándole una velocidad que dependerá del ángulo de disparo del tiristor. Hay que recordar que el tiristor solo se dispara cuando la tensión alterna está en la semionda positiva.

El motor C.C. tiene en su eje un opto encoder que es un disco ranurado que tiene en un lado un led infrarrojo cuya luz pasa a través de las ranuras. Un fototransistor se coloca al lado opuesto al led de tal modo que cuando el motor gira, la luz pasa por las ranuras en forma intermitente. Estos pulsos de luz son enviadas a un transistor para poder ser amplificadas siendo previamente filtrados a través de un condensador. Los pulsos del transistor van al CI 555 el cual está configurado en conexión monoestable. Esta conexión permite obtener una señal de onda cuadrada uniforme a partir de los pulsos que recibe. Así se obtiene la señal que representa el valor medido

proporcional a la velocidad de giro del motor C.C. y que servirá como entrada al circuito comparador.

#### 4.6 Cálculo de la fuente de potencia

El motor de corriente continua deberá ser alimentado con 110 voltios. Será suficiente colocar un transformador 220/110V para conectarlo directamente a la fuente de 220V.

Los motores de paso deberán alimentarse con una tensión continua de 24 voltios. El consumo de corriente por motor de paso es:

Motor de Paso (Carro Transversal) - 1.5 amp/bobina

Motor de Paso (Carro Longitudinal) = 1.5 amp/bobina

Motor de Paso (Carro Vertical) - 4.0 amp/bobina

Debemos tener en cuenta que en cada motor se energizarán dos bobinas simultáneamente por tanto la corriente total será de 14 Amperios. La potencia de esta fuente deberá ser de 340 Watts. Se optó por conseguir un transformador de 500 Watts de 220/24 voltios, colocando un rectificador de onda a su salida para obtener tensión continua.

Para alimentar a los circuitos electrónicos y de control se utilizó una fuente que normalmente se utiliza en computadoras que ofrecen tensiones continuas de +5v, +12v, -5v y -12v.

CAPITULO 5  
SISTEMA DE PROGRAMAS

El sistema de programas desarrollado nos permite realizar la edición, simulación y ejecución de las órdenes de control numérico de la pieza a mecanizar. Mostraremos en un diagrama las etapas para realizar la fabricación de una pieza.

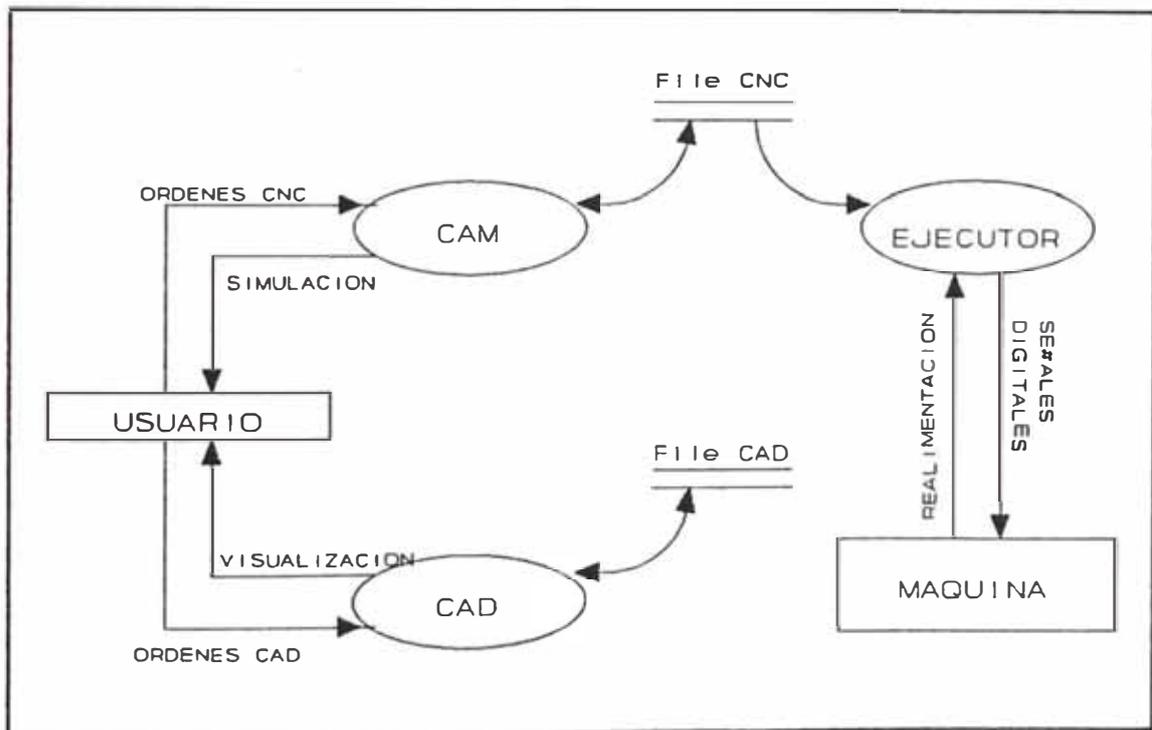


Figura 5-1

Detallamos a continuación los módulos CAD, CAM y de ejecución desarrollados.

### 5.1 Módulo CAD

En la fabricación de una pieza en una máquina de control numérico debe definirse las dimensiones de la pieza en bruto a mecanizar y también las de la pieza final. Para dibujarlas se vio conveniente utilizar el programa AutoCAD ya que brinda una gran facilidad para dibujar cualquier pieza y para su dimensionamiento. Las ventajas del uso de AutoCAD se puede resumir en lo siguiente:

El AutoCAD dispone de un sistema de menús personalizados que permiten utilizar las rutinas de

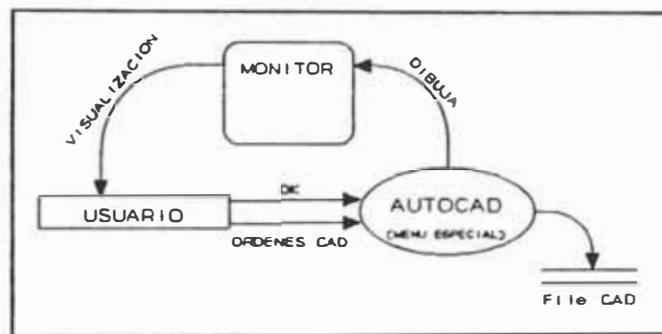


Figura 5-2

dibujo que permitirán de una manera más sencilla dibujar y dimensionar la pieza en bruto y la pieza final

Permite realizar la impresión gráfica de las piezas para su documentación.

Se puede editar y modificar en forma rápida alguna pieza anteriormente definida.

Las piezas inicial y final dibujadas servirán como referencia al momento de realizar la simulación gráfica, ya que ésta se realizará también dentro del entorno AutoCAD, como se verá más adelante.

## 5.2 Módulo CAM

Este módulo comprende dos etapas:

Editor de las órdenes de CNC

Simulación gráfica de la trayectoria de la herramienta

### 5.2.1 Editor de Ordenes de Control Numérico

Para lograr la fabricación de una pieza en una máquina de control numérico debe elaborarse en

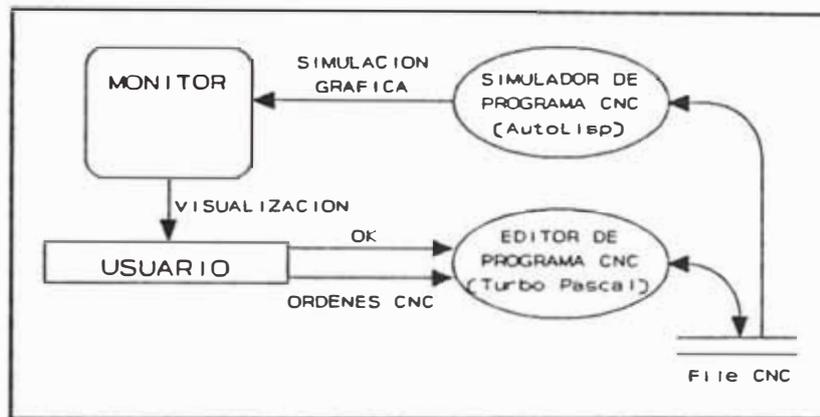


Figura 5-3

primer lugar el dibujo de definición de la pieza. Hecho esto, debe definirse la trayectoria que seguirán las herramientas en el proceso de mecanizado de la pieza, y por último se escribirá el programa.

Para escribir los bloques del programa C.N. se utilizará el editor EDITFRE.EXE, el cual se ha elaborado utilizando el lenguaje Pascal. Cada bloque de programa consta de los siguientes parámetros:

- N - número de línea
- G = función preparatoria

X,Y,Z = coordenadas de la trayectoria de la herramienta.

I,J - coordenadas auxiliares

F - velocidad de avance

S = velocidad de giro de la herramienta

T - selección de la herramienta a usar

M - función auxiliar

El orden de ejecución de los bloques estará dado por el parámetro N.

El editor cargará a memoria el último programa que se editó. También se da la opción de crear un nuevo programa o de cargar a memoria un programa anteriormente editado. Al introducir valores de cada uno de los parámetros, el editor verificará si dicho valor se encuentra dentro del rango permisible para tal parámetro y en caso de no serlo generará un sonido dando aviso del error y pedirá un nuevo valor. La cantidad máxima de bloques que puede tener un programa será de 250 bloques.

Ya que es importante visualizar la trayectoria teórica que seguirá la herramienta, se usará este programa en combinación con un programa desarrollado en AutoLisp dentro del entorno de AutoCAD mediante el cual podremos simular dicha trayectoria. El simulador se explicará con detalle posteriormente.

Al finalizar la edición del programa se

salvará el programa en disco para que pueda ser utilizado por el simulador y también por el programa que ejecuta las ordenes CNC en la máquina. Este archivo estará en formato ASCII para facilitar su lectura por diversos programas.

El formato utilizado en este editor es el siguiente:

```
N3 G2 X4.2 Y4.2 Z4.2 I4.2 J4.2 F4 S3 T1 M2
```

El numero a la derecha de N,G,F,S,T,M significa la cantidad de dígitos que pueden editarse para cada función, y el valor para X,Y,Z,I,J significa que podrá programarse 4 cifras enteras y 3 decimales.

### 5.2.2 Simulación de la Trayectoria de la Herramienta

Es bastante probable que al programar bloques de control numérico se produzcan errores al digitar o calcular alguna coordenada de la trayectoria deseada. Es por esto que se requiere de un simulador que permita visualizar en pantalla la trayectoria que seguirá la herramienta en la máquina.

El paquete AutoCAD dispone de un lenguaje de programación llamado AutoLisp que permite crear MACROS y disponer de todas las variables del programa AutoCAD. Los programas en LISP deberán ejecutarse dentro del entorno AutoCAD.

Para desarrollar el simulador se utilizó el LISP ya que nos brinda la facilidad de usar las rutinas de generación de rectas, arcos, textos, etc., que dispone el AutoCAD. Este lenguaje también ofrece la posibilidad de leer archivos ASCII, por lo cual podremos acceder los archivos generados por el editor de CNC.

Los alcances de este simulador son:

Ya que la simulación se hace dentro del entorno AutoCAD se podrá hacer una comparación de la pieza final definida por la trayectoria de la herramienta y la pieza final dibujada en el módulo CAD.

La simulación se realizará al seleccionar la opción correspondiente en el menú personalizado. Permite la visualización secuencial del número de programa que se está ejecutando , así como las condiciones de maquinado, es decir, la velocidad de avance y velocidad de rotación del husillo.

Indica el tiempo que demorará cada bloque del programa basándose en la velocidad de avance de la pieza con respecto a la herramienta; también indicará el tiempo total de maquinado.

El inicio de los desplazamientos de la herramienta se define ubicando el punto cero de la pieza antes de iniciar la simulación.

En caso de existir un error en la simulación, se

puede inmediatamente entrar al editor para realizar la corrección correspondiente mediante una opción en el menú y volver a hacer la simulación.

Las rutinas principales del programa desarrollado en AutoLISP son las siguientes:

INICIO : Inicializa las variables del programa simulador.

LIMPIA : Borra las capas de la última simulación.

ABRE : Busca el último archivo editado y lo abre para su posterior lectura.

ACERAR : Se encarga de recibir las coordenadas del punto cero de la pieza por parte del usuario.

LAZO : Esta rutina se encarga de leer secuencialmente el archivo abierto y simular en el monitor las órdenes CNC. Esta rutina hace usos de las rutinas secundarias.

FINAL : Repone variables del sistema AutoCAD.

Mencionaremos en forma breve el objetivo de las rutinas secundarias:

G00 : Rutina que simula función G00 (desplazamientos con avance máximo)

G01 : Rutina que simula la función G01

- (desplazamientos con velocidad de avance programada)
- G0203 : Rutinas para simular trayectorias circulares.
- G40 : Anulación del ciclo de corrección por radio de la herramienta
- G41 : Corrección por radio de la herramienta hacia la izquierda.
- G42 : Corrección por radio de la herramienta hacia la derecha.
- G77 : Ciclo de taladrado en círculo graduado.
- F00 : Visualiza en pantalla la velocidad de avance que es definida en el programa.
- S00 : Visualiza en pantalla la velocidad de giro del husillo definida en el programa..
- T00 : Visualiza en pantalla el número de la herramienta seleccionada
- TIMER : calcula el tiempo que demora cada operación de maquinado y el tiempo total de la fabricación de la pieza.

### 5.3 Módulo de Ejecución del Proceso de Mecanizado

Luego de escribir las órdenes de control numérico y verificar su correcto funcionamiento mediante el simulador se procederá a enviar las órdenes a la fresadora utilizando para ello el programa

EJECUFRE.EXE; éste a su vez llamará a las rutinas de bajo nivel de la unidad PORTS.TPU. En la unidad se definieron las rutinas que hacen la transferencia de datos a los circuitos electrónicos de control de la fresadora. Tanto el programa como la unidad han sido programados usando el lenguaje Pascal.

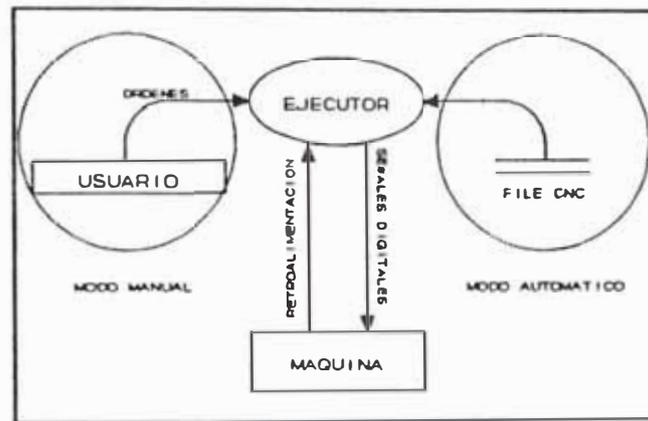


Figura 5-4

El programa principal presenta en pantalla 3 opciones al usuario y son:

Modo Automático

Modo Manual

Edición de órdenes CNC

En el Modo Automático, el programa de ordenes CNC será ejecutado en forma automática en la fresadora vertical. Para esto el programa cargará a memoria todos los bloques del programa de C.N. y luego de procesarlos enviará las señales correspondientes, a través de la tarjeta decodificadora, a los circuitos de control de la fresadora y éstos, a su vez, controlarán los desplazamientos de los carros en los tres ejes.

El **Modo Manual** nos permite ubicar el punto cero de la pieza, a partir del cual empezarán los desplazamientos relativos a la herramienta. También nos permitirá mecanizar una pieza en forma manual, controlando la dirección de los desplazamientos de los carros con el teclado, y fijando la velocidad de avance y velocidad de giro del husillo. En este modo se podrá apreciar a través del monitor y en todo momento las coordenadas X,Y y Z de la pieza con respecto a la herramienta.

La opción de Edición de órdenes CNC nos permitirá entrar al editor para hacer correcciones necesarias en caso que la ejecución no se realice como se esperaba.

En la programación del modo automático se ha desarrollado una rutina para cada una de las funciones G y M. Las funciones T, S y F tendrán cada una de ellas una rutina a la que se le enviará el dato de entrada correspondiente.

Mencionaremos brevemente el funcionamiento de cada rutina de las distintas funciones del programa principal EJECUFRE.EXE.

### 5.3.1 Rutinas del programa principal

#### **G00**

Parámetros: X,Y,Z Coordenadas del nuevo punto a desplazarse.

Objetivo : Envía los puntos de desplazamiento a la

rutina anterior teniendo en cuenta si está activada la corrección por radio de la herramienta. El desplazamiento será hecho a la máxima velocidad posible de los motores de paso.

### **G01**

Parámetros: X,Y,Z Coordenadas del nuevo punto a desplazarse.

Objetivo : Similar al anterior excepto que la velocidad del desplazamiento corresponderá a la velocidad de avance programada.

### **G02**

Parámetros: X,Y,Z Coordenadas del nuevo punto a desplazarse. I,J Coordenadas del centro del arco.

Objetivo : Teóricamente los carros deben desplazarse siguiendo una trayectoria circular en sentido horario. Sin embargo, en el programa lo que se hace es dividir dicha trayectoria circular en varios tramos rectos pequeños. Por lo tanto esta rutina enviará en forma sucesiva cada uno de los desplazamientos a la rutina Calc\_Frec\_y\_Pulsos hasta completar toda la trayectoria circular.

La magnitud de los tramos se ha fijado en 1 milímetro.

También se tendrá en cuenta si las funciones G41 o G42 se encuentran activadas para desplazar la herramienta.

### **G03**

Parámetros: X,Y,Z Coordenadas del nuevo punto a desplazarse. I,J Coordenadas del centro del arco.

Objetivo : Similar a la rutina anterior pero el desplazamiento será en sentido antihorario.

**G04**

Parámetro : X Tiempo en segundos de espera.

Objetivo : Realiza un parada en el proceso de mecanizado un tiempo en segundos dado por el parámetro correspondiente. El giro de la herramienta no se detiene.

**G41 G42**

Objetivo : Este procedimiento es el más extenso y complejo y se encarga de realizar las correcciones de radio de la herramienta. Debe tener en cuenta tanto la trayectoria actual como la siguiente para poder realizar los cálculos correctamente. En el primer capítulo se mostraron los distintos tipo de corrección de herramienta posibles. Gráficamente se mostrará la secuencia de cálculo para dos casos.

Según el gráfico hallaremos la distancia K mediante:

$$L = \sqrt{R^2 - |Comp_{AB}BQ|^2} - |RH|^2 \quad \dots(5.1)$$

$$M = \sqrt{(R+RH)^2 - L^2} \quad \dots(5.2)$$

$$K = M - |Comp_{AB}BQ| \quad \dots(5.3)$$

Conociendo la distancia K obtenemos el punto B'' y a partir de allí y con vector unitario perpendicular a AB se desplazará una distancia igual al radio de la herramienta (RH) en uso hasta encontrar el punto B'. Este será el punto al cual deberá desplazarse la herramienta.

Este cálculo solo servirá cuando la recta AB y la tangente del arco BC en el punto B sea entre 0 y 180 grados sexagesimales.

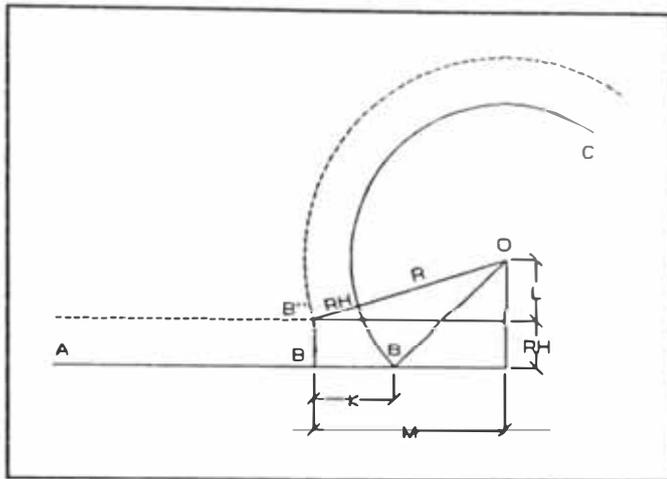


Figura 5-5

Para el caso en que el ángulo esté comprendido entre 180 y 360 grados, se ve del gráfico que bastará hallar la perpendicular a AB en el punto B y desplazarla una distancia RH y encontrar B'.

Del mismo modo en dirección a la perpendicular del arco BC en el punto B encontraremos el punto B". En este caso la

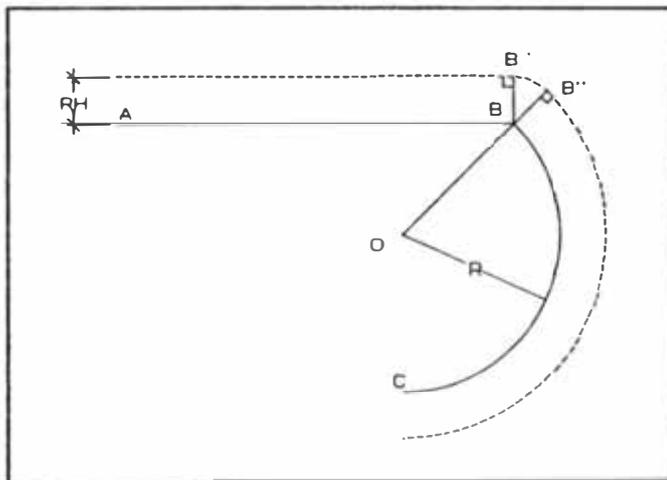


Figura 5-6

herramienta se desplazará primero al punto B' y luego generará un arco de B' a B" teniendo como radio RH.

Deberá tenerse en cuenta el caso en que recién se active la función G41 o G42 ya que el primer punto a desplazarse será distinto que si ya se encontrase la función activada, tal como se muestra en los siguientes gráficos.

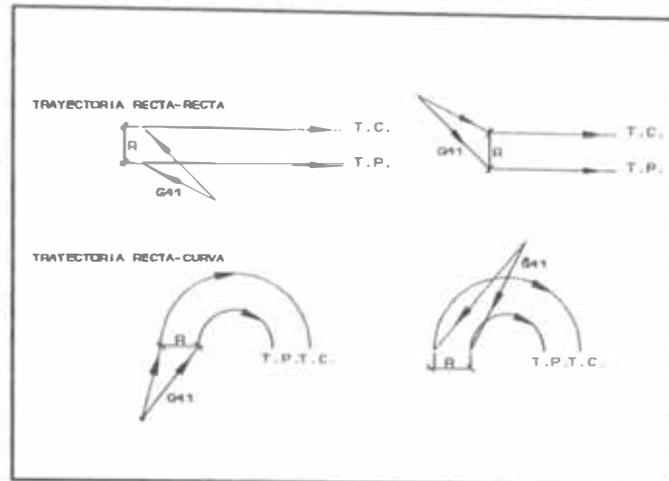


Figura 5-7

Del mismo modo, al terminar la compensación con la función G40, el cálculo para desplazar la herramienta será otro. Los distintos tipos de fin de compensación se muestran a continuación.

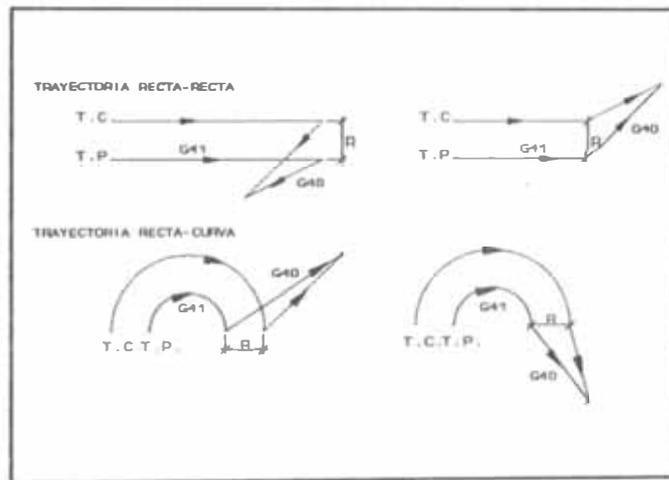


Figura 5-8

### G77

Parámetros: X Radio del círculo

Z Profundidad de los agujeros

J Número de agujeros a taladrar

I Angulo con respecto al eje X

Objetivo : Ejecuta el ciclo de taladrado disponiendo en forma equidistante a los agujeros sobre el círculo definido por X. El primer agujero lo realizará en el

punto del círculo que intersecte a la recta que forma un ángulo (definido por I) con el eje X. El taladrado lo realiza a la velocidad de avance programada y el desplazamiento hacia cada agujero lo hace a la máxima velocidad de avance.

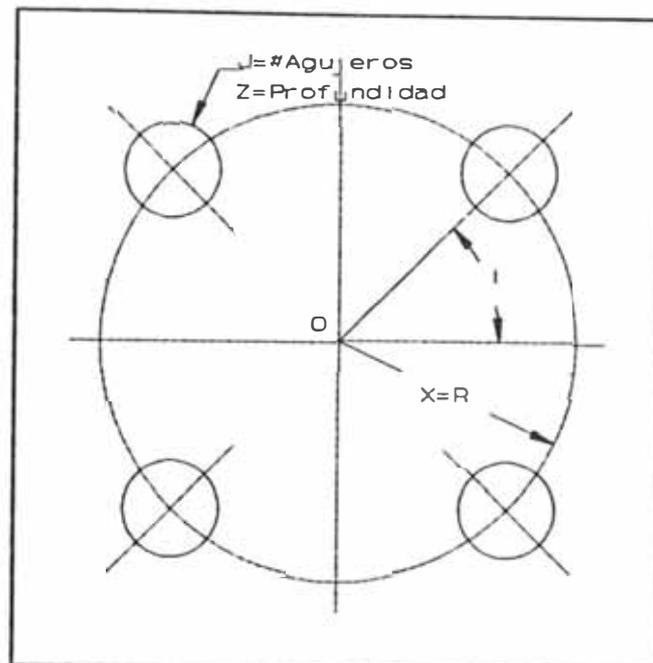


Figura 5-9

**G90**

Objetivo : Determina que las coordenadas dadas están en coordenadas absolutas.

**G91**

Objetivo : Determina que las coordenadas dadas están en coordenadas relativas al punto anterior.

**G92**

Objetivo : Permite una traslación del punto cero de la máquina a un punto conveniente.

**CALC\_FREC\_Y\_PULSOS**

Parámetros : P1,P2 : Coordenadas del punto inicial y punto final del desplazamiento.

Objetivo : Esta rutina es utilizada por todas las funciones que incluyan algún desplazamiento. Evalúa el desplazamiento que debe realizarse en cada eje y a continuación calcula tanto el numero de pulsos como la frecuencia de giro del stepper, así como la dirección del desplazamiento. La frecuencia se calcula conociendo la velocidad de avance (FF), relación de transmisión del motor de paso a la maquina (Nt), # de pulsos por vuelta del motor de paso (Steps), avance por vuelta de la maquina(AvVuelMaq), y la componente del desplazamiento según el eje (Vector / Modulo(Vector)).

La fórmula para hallar la frecuencia de giro es:

$$Frec = \frac{FF * Steps * Nt}{AvVuelMaq} * \frac{Vector_i}{|Vector|} \quad ..(5.4)$$

En caso de que se encuentre activada la función G00 se considerará la mayor velocidad posible en los motores de paso.

Estos datos servirán como parámetros de entrada a la rutina PROG STEPPER.

El número de pulsos se calculará de la siguiente manera:

$$Puls = \frac{Steps * Vector * Nt}{AvVuelMaq} \quad ..(5.5)$$

Debe señalarse que cuando se opera manualmente esta máquina los tres carros de la máquina presentan un juego en la manivela cuando se hace un cambio de sentido del desplazamiento. Aún cuando la manivela

gira un cierto ángulo, el carro no se desplaza en absoluto hasta que se haya vencido este juego.

Esta rutina se encargará también de controlar dicho juego, y por tanto, al detectar un cambio de sentido en el desplazamiento, antes de iniciar el desplazamiento programado, enviará un número de pulsos a la manivela para que gire un ángulo que corresponda al juego que tiene.

**M02**

Objetivo : Detiene el giro del husillo y da por finalizado el maquinado.

**M03**

Objetivo : Da la señal para empezar la marcha del husillo a la derecha.

**M05**

Objetivo : Detiene el giro del husillo.

**M06**

Objetivo : Envía un mensaje en pantalla requiriendo que se haga el cambio de herramienta.

**M30**

Objetivo : Similar a la rutina M02 pero deja listo a la máquina para empezar nuevamente el mecanizado a partir del primer bloque.

Muchas de estas rutinas hacen uso de la trigonometría así como del algebra vectorial tridimensional.

Al iniciar un programa se toma por defecto lo siguiente:

La velocidad del desplazamiento será la velocidad de avance.

No hay corrección por el radio de la herramienta.

Las coordenadas están dadas en coordenadas absolutas.

Velocidad del husillo será nula.

La herramienta seleccionada es la herramienta 0 (cero).

### 5.3.2 Rutinas de la unidad PORTS

A continuación se explicará con detalle las rutinas principales del programa de bajo nivel de la unidad PORTS que se encarga de enviar las señales a la tarjeta decodificadora.

#### *PROG STEPPER*

Parámetros : Frecuencia y Número de Pulsos de cada desplazamiento.

Objetivo : Esta rutina se encargará de programar los PIT correspondientes a los motores de paso cada eje de la fresadora y fijará el número de pulsos que deben girar los motores de paso así como la frecuencia de dichos pulsos.

#### *START\_STEP*

Parámetros : Inicio y dirección de los desplazamientos.

Objetivo : Envía la señal correspondiente a los secuenciadores de los motores de paso indicándoles en

que sentido deben girar. Simultáneamente envía una señal a los PIT indicando que deben empezar a enviar los pulsos programados al secuenciador. La magnitud y velocidad del desplazamiento fue previamente definida por PROG STEPPER.

#### ***WAIT\_END\_STEPPER***

Objetivo : Este procedimiento se encarga de recibir las señales de los PIT indicando que el desplazamiento en cada eje se ha completado. Solo después de que las 3 señales se hayan recibido se procederá a programar los siguientes desplazamientos.

#### ***LIMIT SWITCH***

Objetivo : Cada uno de los carros correspondientes a los tres ejes dispone de dos micro-switch en cada extremo de su carrera para evitar colisiones o que se salgan de sus guías. En caso que algún micro-switch se activara, el programa detendrá el movimiento en los tres ejes, la herramienta dejará de girar y aparecerá un mensaje de emergencia en pantalla. Normalmente esto no debe ocurrir.

#### ***SET\_CLOCK\_PIT***

Parámetros : Frecuencia base para los PIT.

Objetivo : Cuando los motores de paso tengan que girar a una alta frecuencia deberán alcanzar dicha frecuencia gradualmente y no en forma brusca puesto

que se corre el riesgo de perder pasos. Por lo tanto, la frecuencia base de los PIT deberá incrementarse gradualmente hasta alcanzar la frecuencia de trabajo nominal, con lo cual se conseguirá una aceleración de los motores de paso. Con esto no solo se consigue evitar la pérdida de pasos sino también permite lograr mayores velocidades. Esta rutina envía los datos de frecuencia al latch del circuito generador de clock que luego será usado por el CI XR-2206, que se explicó en el capítulo anterior.

#### *SET\_RPM*

Parámetro : Velocidad de giro de la Herramienta.

Objetivo : Se encarga de fijar la velocidad a la cual deberá girar la herramienta. Esto lo hace fijando un valor en el Conversor Digital-Analógico, el cual a su vez enviará un valor de tensión al circuito de control proporcional de velocidad del motor de corriente continua. El parámetro que recibe esta rutina está dado en mm/minuto. Sin embargo, debe hacerse una conversión previamente para poder enviarlo al conversor D/A.

## CAPITULO 6

### ANALISIS ECONOMICO

En una fresadora automatizada se reducen bastante los tiempos muertos, los desplazamientos se realizan a una alta velocidad, se pueden realizar cortes de forma compleja, etc. Además una sola persona es capaz encargarse de más de una máquina a la vez. Todo esto representa una gran ventaja con respecto a las máquinas convencionales. El gran inconveniente es la alta inversión que hay que efectuar para automatizar dicha máquina. Con respecto a las máquina fabricadas con CNC incorporado se aplica todo lo anterior, pero el costo es aún mayor.

Por tanto, debemos conocer para qué condiciones de trabajo es preferible una máquina automatizada, una maquina CNC de fábrica o una convencional. Concretamente nos interesa saber la cantidad mínima de piezas a fabricar de un mismo lote a partir del cual es rentable una u otra máquina mencionada previamente.

#### 6.1 Análisis económico de una fresadora vertical convencional

Debemos hallar el valor del costo de manufactura de una pieza típica. Para esto debemos calcular el costo

horario de operación de la máquina, costo del material y de las herramientas y el tiempo de ejecución de la pieza. La fórmula para hallar este costo es:

$$C_{Manuf} = C_h \times T_e + C_{Mat} + C_{Herr} \quad \dots(6.1)$$

donde:  $C_h$  = costo horario operación de la máquina

$C_{Mat}$  = costo del material

$C_{Herr}$  - costo de la herramienta

$T_e$  - tiempo de ejecución de una pieza

#### 6.1.1 Costo horario de operación de la máquina ( $C_h$ )

En este costo está incluido el costo horario de la máquina (M), gastos generales (B) y mano de obra directa (L). Por tanto:

$$C_h = M + L + B \quad \dots(6.2)$$

#### Costo Horario de Máquina (M)

Este costo comprende el costo de depreciación de la máquina en el tiempo, los intereses y el costo de mantenimiento de la máquina.

$$M = \frac{(\text{Depreciación} + \text{Intereses} + \text{Mantenimiento})}{\text{Horas de utilización} \times f.u.} \quad \dots(6.3)$$

#### *Depreciación anual*

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Costo Fresadora}}{\text{Tiempo Depreciación}} \quad \dots(6.4)$$

Tiempo de depreciación - 10 años

Costo de la fresadora = 2000 \$

Valor de salvamento = 0

==> Depreciación anual = 200 \$

### ***Interés anual***

$$\text{Interés anual} = \text{Costo Fresadora} \times \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \dots (6.5)$$

n = vida útil de la fresadora = 10 años

i = tasa interés anual en \$ = 8% anual

==> Interés anual = 298 \$

### ***Costo anual de mantenimiento:***

Lo consideraremos como el 50 % del costo de depreciación anual de la máquina.

$$\text{Mantenimiento} = 0.5 \times \text{Depreciación} \dots (6.6)$$

==> Mantenimiento anual = 100 \$

***Horas al año durante un turno*** ==> 2000 horas

***Factor de utilización*** ==> 0.7

Reemplazando en la ecuación (6.3):

$$M = 0.427 \text{ \$/hr}$$

### **Costo horario por mano de obra directa (L):**

Considerando una jornada laboral de 8 horas/día tenemos:

Jornal diario del operador = 7.15 \$/día

L = Jornal / 8 horas

L = 0.89 \$/hora

**Gastos Generales (B):**

Este depende de la distribución de los gastos entre las máquinas del taller. Se considera un porcentaje de la mano de obra directa.

$$B = 120\% \cdot L$$

$$B = 1.07 \text{ \$/hora}$$

Usando la fórmula (6.2) el costo horario de operación de la máquina resulta:

$$Ch = 2.39 \text{ \$/hora}$$

**6.1.2 Costo de material (C<sub>mat</sub>)**

Se usará para cada pieza una bloque rectangular de 80x60x40 mm y el material será aluminio. La pieza a fabricar se muestra a continuación.

$$C_{\text{Mat}} = 0.7 \text{ \$/pieza}$$

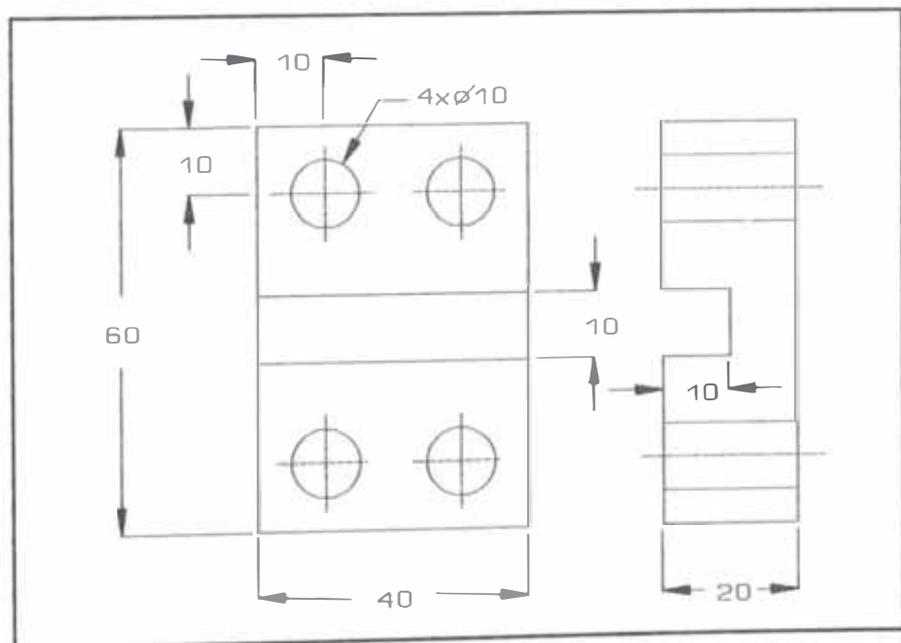


Figura 6-1

### 6.1.3 Tiempo de ejecución de una pieza (Te)

A continuación debemos calcular el tiempo que demora en ejecutar una pieza con la velocidad y avance fijados. Para ello hacemos el siguiente análisis de tiempos:

$$Te = Tm + Ti \quad \dots\dots(6.7)$$

donde:

Te - tiempo de ejecución de una pieza.

Tm - tiempo productivo o maquinado efectivo.

Ti - tiempo improductivo.

El tiempo improductivo lo hallamos según:

$$Ti = T_{med} + T_{mon} + T_{desp} + T_{otros} \quad \dots\dots(6.8)$$

donde:

Tmed - tiempo usado en las mediciones de la pieza.

Tmon = tiempo usado en montaje y desmontaje de la pieza.

Tdesp = tiempo de desplazamiento sin maquinado.

Totros= otros tiempos no productivos.

Posteriormente se calculará la velocidad óptima de corte y ésta dependerá del tipo de mecanizado que se realice. Ya que la pieza a ser analizada comprende el taladrado de 4 agujeros y un ranurado, calcularemos los tiempos separadamente.

Para el ranurado de la pieza mostrada

tendremos las condiciones de mecanizado siguientes:

$$\text{RPM} = 1900$$

$$\text{Avance por diente} = 0.02 \text{ mm/diente}$$

$$\text{Velocidad Avance} = 76 \text{ mm/min}$$

$$\text{Longitud ranura} = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Tiempo de 1 ranura} = 47 \text{ seg}$$

$$\# \text{ ranuras/pieza} = 3 \text{ (se hará en 3 pasadas)}$$

Se obtiene:

$$T_{m_{\text{ran}}} = 2.37 \text{ min}$$

Además tenemos:

$$T_{\text{med}} = 1.0 \text{ min}$$

$$T_{\text{mon}} = 1.0 \text{ min}$$

$$T_{\text{desp}} = 1.3 \text{ min}$$

$$T_{\text{otros}} = 2.0 \text{ min}$$

---

$$T_{i_{\text{ran}}} = 5.3 \text{ min}$$

Por tanto, obtenemos un tiempo de ejecución de pieza igual a:

$$T_{e_{\text{ran}}} = 7.67 \text{ min}$$

Del mismo modo calculamos el tiempo para el taladrado de los cuatro agujeros teniendo las siguientes condiciones:

$$\text{RPM} = 1900$$

$$\text{Avance por diente} = 0.02 \text{ mm/diente}$$

$$\text{Velocidad de Avance} = 76 \text{ mm/min}$$

$$\text{Profundidad Agujero} = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Tiempo de 1 agujero} = 17 \text{ seg}$$

$$\# \text{ agujeros/pieza} = 4$$

Se obtiene:

$$T_{m_{\text{Tal}}} = 1.16 \text{ min}$$

Además tenemos:

$$T_{\text{med}} = 3.00 \text{ min}$$

$$T_{\text{mon}} = 0.00 \text{ min}$$

$$T_{\text{desp}} = 3.75 \text{ min}$$

$$T_{\text{otros}} = 2.00 \text{ min}$$

---

$$T_{i_{\text{Tal}}} = 8.75 \text{ min}$$

Obtenemos un tiempo de taladrado igual a:

$$T_{e_{\text{Tal}}} = 8.75 \text{ min}$$

El tiempo total de ejecución de la pieza completa, es decir, considerando la ranura y los agujeros resulta:

$$T_e = 16.42 \text{ min}$$

#### 6.1.4 Costo de la herramienta (CHerr):

Este costo está dado por el costo de suministro de una fresa afilada (CF) dividido entre el número piezas que se pueden maquinar con una misma fresa (NP).

$$C_{\text{Herr}} = \frac{CF}{NP} \quad \dots\dots(6.9)$$

**Cálculo del costo de suministro de una herramienta afilada (C<sub>f</sub>)**

Para hallar este costo debemos conocer el costo de la herramienta propiamente dicha (C<sub>fresa</sub>), el costo de afilado (C<sub>Af</sub>) y el número de afiladas posibles (N<sub>Af</sub>).

$$C_F = C_{Af} + \frac{C_{Fresa}}{N_{Af}} \quad \dots\dots(6.10)$$

$$C_{Fresa} = 21.5 \text{ \$ (Fresa acero rápido de } \varnothing 10 \text{ mm)}$$

$$C_{Af} = 2.0 \text{ \$/filo}$$

$$N_{Af} = 15 \text{ Afiladas/fresa}$$

Reemplazando obtenemos:

$$C_F = 3.43 \text{ \$/fresa afilada}$$

Cálculo de Número de Piezas por fresa (NP)

Para conocer el NP debemos calcular el tiempo de vida de la herramienta y el tiempo de ejecución de una pieza para las condiciones de velocidad de corte seleccionadas.

$$NP = \frac{T_{vida \text{ fresa}}}{T_m} \quad \dots\dots(6.11)$$

La velocidad de corte dependerá del ángulo de contacto entre la herramienta y la pieza. Ya que la pieza objeto de nuestro análisis consta de agujeros y un ranura, tendremos que hacer un cálculo por separado para cada uno de los tipos de maquinado como si fueran piezas distintas, para finalmente hallar un número de piezas equivalente que se puedan fabricar con cada fresa.

Empezaremos haciendo el cálculo de número de piezas considerando la ranura central

(ranurado).

Se desea que el costo de manufactura sea el mínimo, por tanto, deberemos utilizar la velocidad de corte óptima. Esta velocidad puede obtenerse mediante la formula:

$$V_{\text{óptima}} = V_r \cdot \left( \frac{1}{Q} \cdot \frac{n}{(1-n)} \cdot \frac{Ch \times t_r}{(Ch \times t_{ct} + C_f)} \right)^n \dots\dots(6.12)$$

donde:

$V_r$  = veloc. de corte para vida 1 min. = 3 m/s

$t_r$  = tiempo de vida = 1 minuto

$n$  = índice de Taylor = 0.125 para cuchilla de acero rápido.

$t_{ct}$  = Tiempo de cambio de herramienta.

$Q = \theta/2\pi$  = factor de corrección del tiempo de mecanizado durante el cual la fresa está cortando a la pieza.  $\theta$  es el ángulo de contacto entre herramienta y pieza. Ya que estamos haciendo una ranura,  $\theta = \pi$ .

Reemplazando en la ecuación anterior:

$$V_{\text{óptima}} = 0.9778 \text{ m/s}$$

La velocidad de giro del cabezal la hallamos de la velocidad de corte y el diámetro de la fresa ( $\varnothing 10\text{mm}$ )

$$\text{RPM}_{\text{óptima}} = 1867 \text{ RPM}$$

Como la fresadora solo tiene cuatro velocidades posibles, escogeremos la que más se acerque a la velocidad óptima.

$$\text{RPM}_{\text{selecc}} = 1900 \text{ RPM}$$

Recalculando:

$$V_{\text{corte}} = 0.995 \text{ m/s}$$

Ahora calcularemos mediante la ecuación de Taylor, el tiempo de vida de la fresa para la velocidad de corte seleccionada:

$$t_{\text{vida}} = t_r \cdot \left( \frac{V_r}{V_{\text{Corte}}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots(6.13)$$

$$t_{\text{vida}} = 533.6 \text{ min}$$

Reemplazamos en la fórmula de (6.11) y obtenemos:

$$N_{\text{Pranura}} = 225 \text{ piezas/fresa}$$

Haremos ahora el cálculo del número de piezas considerando los 4 agujeros de la pieza (taladrado).

Del mismo modo, el costo de manufactura debe ser el mínimo, es por esto que debemos hallar la velocidad de corte óptima mediante la ecuación (6.12).

Sabemos que  $Q = \Theta/2\pi$ . En este caso por ser taladrado  $\Theta=2\pi$ , por lo tanto  $Q=1$ .

Reemplazando en la fórmula tenemos:

$$V_{\text{óptima}} = 0.8966 \text{ m/s}$$

La velocidad de giro del husillo será:

$$\text{RPM óptima} = 1712 \text{ RPM}$$

Como la fresadora solo tiene cuatro velocidades posibles, escogeremos la que más se acerque a la velocidad óptima.

$$\text{RPMselecc} = 1900 \text{ RPM}$$

Recalculando:

$$V_{\text{corte}} = 0.9948 \text{ m/s}$$

Ahora calcularemos mediante la ecuación de Taylor, el tiempo de vida para la velocidad de corte seleccionada:

$$t_{\text{vida}} = 533.6 \text{ min}$$

Reemplazamos en la fórmula (6.11) y obtenemos:

$$NP_{\text{taladrado}} = 230 \text{ piezas/fresa}$$

Para hallar el número de piezas incluyendo ranuras y taladrados por fresa usamos la siguiente expresión:

$$\frac{1}{NP} = \left( \frac{1}{NP_{\text{ranura}}} + \frac{1}{NP_{\text{taladrado}}} \right) \dots\dots(6.14)$$

Reemplazando en la ecuación obtenemos:

$$NP = 113 \text{ piezas/fresa}$$

Evaluando la fórmula (6.9) obtenemos el costo de la herramienta por pieza fabricada:

$$C_{\text{herr}} = 0.03 \text{ \$/pieza}$$

Finalmente podemos calcular el costo de manufactura por pieza.

Reemplazando en la ecuación (6.1) obtenemos:

$$C_{\text{Manuf}} = 1.4315 \text{ \$/pieza}$$

## 6.2 Análisis económico de una fresadora vertical Automatizada

El costo material para automatizar la fresadora vertical comprende los materiales utilizados en el diseño de la transmisiones mecánicas, y los dispositivos de accionamientos eléctricos y componentes electrónicos del control.

Mostramos a continuación el costo de los materiales utilizados.

Tabla 6.1 Dispositivos y Componentes Electrónicos

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
CI 7402	3	1	3,00
CI 7404	5	1	5,00
CI 7408	3	1	3,00
CI 7411	4	1	4,00
CI 74LS373	4	3	12,00
CI 74LS244	7	2	14,00
CI 8253	3	8	24,00
CI 74194	3	4	12,00
CI TL 081	2	2	4,00
CI XR-2206	1	10	10,00
DAC 0800 (conversor D/A de 8 bits)	2	8	16,00
Disipadores de Calor	12	1	12,00
Transistor NPN BC107	1	1	1,00
Transistores BD681 Darlington NPN	12	5	60,00
Resistencias, diodos, condensadores, etc.		20	20,00
Potenciómetro 10 KOhms	2	2	4,00
Tarjeta Decodificadora	1	25	25,00
Stepper Motors 0.8 Nm Bautz HY200-2232-190A8	1	100	100,00

Stepper Motors 1.1 Nm Bautz HY200-3424-130A8	1	115	115,00
Stepper Motors 2.2 Nm Bautz HY200-3437-400A8	1	163	163,00
Motores de Corriente Continua (0,5 HP)	1	170	170,00
Fuente Switching +5,-5,+12,-12 V 10A	1	80	80,00
Fuente de Potencia de 24 V.y 20 A.	1	80	80,00
Tarjetas controladoras de velocidad DC	1	140	140,00
Tarjetas Impresas	6	20	120,00
Caja Metálica	1	20	20,00
Cable de 40 hilos	1	2,5	2,50
Cable Twin Axial	2	5	10,00
Cables y Conectores		30	30,00
Micro Switches	6	1,5	9,00
Costo total de dispositivos electrónicos			1.268,50

Tabla 6.2 Costos de materiales para mecánica

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unit US\$	Costo Total US\$
Platina Acero CK45 20x40x120	0,754	Kg	8	6,03
Platina CK45 6x178x220	1,84	Kg	8	14,72
Platina CK45 25x100x200	3,92	Kg	8	31,36
Platina Aluminio 42x110x180 mm	2,32	Kg	2	4,64
Platina Aluminio 125x115x12	0,48	Kg	2	0,96
Eje de Aluminio Diám 90 mm x 160 mm	2,85	Kg	2	5,70
Eje de Aluminio Diám 110 mm x 60 mm	1,60	Kg	2	3,20
Fajas de Sincronización GATES POWERGRIP	3	u.	5	15,00

Tornillos Allen M5x40	3	u.	0,3	0,90
Tornillos Allen M6x20	4	u.	0,3	1,20
Pernos con Tuerca Hexagonal M6x100	4	u,	0,5	2,00
Pernos con Tuerca Hexagonal M4x15	4	u.	0,2	0,80
Pernos con Tuerca Hexagonal M4x80	4	u.	0,3	1,20
Tornillos con Cabeza Hexagonal M6x15	8	u.	0,3	2,40
Tornillos con Cabeza Hexagonal y Tuerca Diám 1/4"NCx2"	10	u.	0,5	5,00
Costo Total de Componentes Mecánicos				95,11

Costo total de la automatización

- Costo de parte mecánica: 100
- Costo de parte electrónica: 1270
- Costo de manufactura: 580
- Costo de ingeniería y software: 1800
- Costo de PC-AT con disco duro: 600

-----  
 Costo total de la automatización: 4350 \$ U.S.

Procedemos de forma similar que en el caso de la fresadora convencional. El costo de manufactura de una pieza está dado por:

$$C_{Manuf} = C_h \times T_e + C_{Mat} + C_{Herr}$$

6.2.1 Costo horario de operación de la máquina (Ch)

$$C_h = M + L + B$$

Costo Horario de Máquina (M)

Este costo está dado según la ecuación (6.3).

Para hallar la depreciación de la máquina

tendremos en cuenta el costo de la fresadora automatizada el cual asciende a \$ 6350.

Realizando los cálculos obtenemos:

- Depreciación anual = 635.0 \$
- Interés anual = 946.3 \$
- Mantenimiento = 317.5 \$
- Horas al año durante un turno = 2000 horas
- Factor de utilización = 0.7

Reemplazando resulta:

$$M = 1.36 \text{ \$/hr}$$

Costo horario por mano de obra directa (L):

Considerando una jornada laboral de 8 horas/día tenemos:

$$\text{Jornal diario del operador} = 12.5 \text{ \$/día}$$

$$L = \text{Jornal} / 8 \text{ horas}$$

$$L = 1.56 \text{ \$/hora}$$

Gastos Generales (B):

Este depende de la distribución de los gastos entre las máquinas del taller. Se considera un porcentaje de la mano de obra directa.

$$B = 120\% \cdot L$$

$$B = 1.88 \text{ \$/hora}$$

Reemplazando datos hallamos el costo horario de operación de la máquina resulta:

$$Ch = 4.79 \text{ \$/hora}$$

### 6.2.2 Costo de material (C<sub>mat</sub>)

Se usará para cada pieza una bloque rectangular de 80x60x40 mm y el material será aluminio.

$$C_{\text{Mat}} = 0.7 \text{ \$/pieza}$$

### 6.2.3 Tiempo de ejecución de una pieza (T<sub>e</sub>)

A continuación debemos calcular el tiempo que demora en ejecutar una pieza con la velocidad y avance fijados en la máquina automatizada.

$$T_e = T_m + T_i$$

$$T_i = T_{\text{med}} + T_{\text{mon}} + T_{\text{desp}} + T_{\text{otros}}$$

Calculamos separadamente el taladrado de 4 agujeros y el ranurado.

Para el ranurado de la pieza mostrada tendremos las condiciones de mecanizado siguientes:

$$\text{RPM} = 2000$$

$$\text{Avance por diente} = 0.02 \text{ mm/diente}$$

$$\text{Velocidad Avance} = 80 \text{ mm/min}$$

$$\text{Longitud ranura} = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Tiempo de 1 ranura} = 45 \text{ seg}$$

$$\# \text{ ranuras/pieza} = 3 \text{ (se hará en 3 pasadas)}$$

Se obtiene:

$$T_{\text{mRan}} = 2.25 \text{ min}$$

Además tenemos:

$$T_{\text{med}} = 0.00 \text{ min}$$

$$T_{\text{mon}} = 2.00 \text{ min}$$

$$T_{\text{desp}} = 0.80 \text{ min}$$

$$T_{\text{otros}} = 0.00 \text{ min}$$

$$\text{-----}$$
$$T_{\text{iRan}} = 2.80 \text{ min}$$

Por lo que obtenemos un tiempo de ejecución de

pieza igual a:

$$T_{e_{ran}} = 5.05 \text{ min}$$

Del mismo modo calculamos el tiempo para el taladrado de los cuatro agujeros teniendo las siguientes condiciones:

$$\text{RPM} = 2000$$

$$\text{Avance por diente} = 0.02 \text{ mm/diente}$$

$$\text{Velocidad de Avance} = 80 \text{ mm/min}$$

$$\text{Profundidad Agujero} = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Tiempo de 1 agujero} = 17.6 \text{ seg}$$

$$\# \text{ agujeros/pieza} = 4$$

Se obtiene:

$$T_{m_{tal}} = 1.17 \text{ min}$$

Además tenemos:

$$T_{med} = 0.00 \text{ min}$$

$$T_{mon} = 0.00 \text{ min}$$

$$T_{desp} = 2.25 \text{ min}$$

$$T_{otros} = 0.00 \text{ min}$$

$$T_{i_{tal}} = 2.25 \text{ min}$$

Obtenemos un tiempo de taladrado igual a:

$$T_{e_{tal}} = 3.42 \text{ min}$$

El tiempo total de ejecución de la pieza completa considerando ranura y agujeros resulta:

$$T_e = 8.47 \text{ min}$$

#### 6.2.4 Costo de la herramienta (CHerr)

Este costo está dado por el costo de suministro de una fresa afilada (CF) dividido entre el número piezas que se pueden maquinar con una misma fresa (NP).

$$C_{Herr} = \frac{CF}{NP}$$

Cálculo del costo de suministro de una herramienta afilada ( $C_F$ )

Consideramos que para la máquina automatizada se usará la misma herramienta de acero rápido de doble estría. Por lo tanto:

$$C_{Fresa} = 21.5 \$ \text{ (Fresa acero rápido de } \varnothing 10 \text{ mm)}$$

$$C_{Af} = 2.0 \$/\text{fresa}$$

$$N_{Af} = 15 \text{ Afiladas/fresa}$$

Reemplazando en la ecuación (6.10) obtenemos:

$$C_F = 3.43 \$/\text{fresa}$$

Cálculo de Número de Piezas por fresa (NP)

Para calcular el NP según la ecuación (6.11) debemos calcular el tiempo de vida de la herramienta y el tiempo de ejecución de una pieza para las condiciones de velocidad de corte seleccionadas.

Procedemos de forma similar al caso anterior, es decir, hacemos el cálculo por separado para el ranurado y taladrado como si fueran piezas distintas.

Empezaremos el cálculo para la ranura central.

La velocidad óptima de corte puede obtenerse mediante la ecuación (6.12).

Los datos son los siguientes:

$$V_r = 3 \text{ m/s}$$

$$t_r = 1 \text{ minuto}$$

$$n = 0.125 \text{ (cuchilla de acero rápido)}$$

$$t_{ct} = 1.5 \text{ minutos}$$

$$Q = 0.5 \text{ } (\theta = \pi)$$

Reemplazando obtenemos:

$$V_{\text{óptima}} = 1.064 \text{ m/s}$$

La velocidad de giro del cabezal la hallamos de la velocidad de corte y el diámetro de la fresa.

$$\text{RPM}_{\text{óptima}} = 2032 \text{ RPM}$$

Como la fresadora automatizada dispone de una amplia gama de velocidades escogemos la más cercana:

$$\text{RPM}_{\text{selecc}} = 2000 \text{ RPM}$$

Recalculamos la velocidad de corte:

$$V_{\text{corte}} = 1.047 \text{ m/s}$$

Ahora calcularemos mediante la ecuación de Taylor, el tiempo de vida para la velocidad de corte seleccionada. Recordando la ecuación

$$t_{\text{vida}} = t_r \cdot \left( \frac{V_r}{V_{\text{Corte}}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$t_{\text{vida}} = 354.0 \text{ min}$$

Reemplazamos en la fórmula (6.11) y obtenemos:

$$N_{\text{Pranura}} = 157 \text{ piezas/fresa}$$

Realizando los mismos cálculos para los 4 agujeros de la pieza tenemos los siguientes resultados:

$$V_{\text{óptima}} = 0.9758 \text{ m/s}$$

$$\text{RPM}_{\text{óptima}} = 1863 \text{ rpm}$$

Escogiendo la velocidad más cercana y recalculando la velocidad de corte:

$$\text{RPM}_{\text{selec}} = 1875 \text{ rpm}$$

$$V_{\text{corte}} = 0.982 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{vida}} = 296.7 \text{ min}$$

El número de piezas será:

$$N_{\text{Ptaladrado}} = 252 \text{ piezas/fresa}$$

El número de piezas incluyendo ranuras y taladrados la hallamos de la ecuación (6.15).

$$NP = 96 \text{ piezas/fresa}$$

Evaluando la ecuación (6.9) tendremos:

$$C_{\text{herr}} = 0.036 \text{ \$/pieza}$$

Finalmente podemos calcular el costo de manufactura por pieza para la fresadora automatizada.

Reemplazando en la ecuación (6.1) obtenemos:

$$C_{\text{Manuf}} = 1.413 \text{ \$/pieza}$$

### 6.3 Análisis económico de una fresadora vertical C.N.C.

Procedemos de forma similar que en el caso de la fresadora convencional. El costo de manufactura de una pieza está dado por:

$$C_{Manuf} = C_h \times T_e + C_{Mat} + C_{Herr}$$

#### 6.3.1 Costo horario de operación de la máquina (Ch)

$$C_h = M + L + B$$

##### Costo Horario de Máquina (M)

Este costo está dado según la ecuación (6.3).

Para hallar la depreciación de la máquina tendremos en cuenta el costo de la fresadora con C.N.C incorporado el cual asciende a \$ 17,500.

Realizando los cálculos obtenemos:

Depreciación anual - 1750 \$

Interés anual = 2608 \$

Mantenimiento 875 \$

Horas al año durante un turno - 2000 horas

Factor de utilización - 0.7

Reemplazando resulta:

$$M = 3.74 \text{ \$/hr}$$

##### Costo horario por mano de obra directa (L):

Considerando una jornada laboral de 8 horas/día tenemos:

Jornal diario del operador - 12.5 \$/día

$$L = \text{Jornal} / 8 \text{ horas}$$

$$L = 1.56 \text{ \$/hora}$$

#### Gastos Generales (B):

Este depende de la distribución de los gastos entre las máquinas del taller. Se considera un porcentaje de la mano de obra directa.

$$B = 120\% \cdot L$$

$$B = 1.88 \text{ \$/hora}$$

Reemplazando datos hallamos el costo horario de operación de la máquina resulta:

$$Ch = 7.18 \text{ \$/hora}$$

#### 6.3.2 Costo de material (Cmat)

Se usará para cada pieza una bloque rectangular de 80x60x40 mm y el material será aluminio.

$$C_{\text{Mat}} = 0.7 \text{ \$/pieza}$$

#### 6.3.3 Tiempo de ejecución de una pieza (Te)

A continuación debemos calcular el tiempo que demora en ejecutar una pieza con la velocidad y avance fijados en la máquina C.N.C.

$$Te = Tm + Ti$$

$$Ti = Tmed + Tmon + Tdesp + Totros$$

Calculamos separadamente el taladrado de 4 agujeros y el ranurado.

Para el ranurado de la pieza mostrada tendremos

las condiciones de mecanizado siguientes:

RPM = 2000  
Avance por diente = 0.02 mm/diente  
Velocidad Avance = 80 mm/min  
Longitud ranura = 60 mm  
Tiempo de 1 ranura = 45 seg  
# ranuras/pieza = 3 (se hará en 3 pasadas)

Se obtiene:

$$T_{m_{kan}} = 2.25 \text{ min}$$

Además tenemos:

$T_{med} = 0.00 \text{ min}$   
 $T_{mon} = 1.50 \text{ min}$   
 $T_{desp} = 0.27 \text{ min}$   
 $T_{otros} = 0.00 \text{ min}$

-----  
 $T_{i_{kan}} = 1.77 \text{ min}$

Por tanto, obtenemos un tiempo de ejecución de pieza igual a:

$$T_{e_{kan}} = 4.02 \text{ min}$$

Del mismo modo calculamos el tiempo para el taladrado de los cuatro agujeros teniendo las siguientes condiciones:

RPM = 2000  
Avance por diente = 0.02 mm/diente  
Velocidad de Avance = 80 mm/min  
Profundidad Agujero = 22 mm  
Tiempo de 1 agujero = 16.5 seg  
# agujeros/pieza = 4

Se obtiene:

$$T_{m_{tal}} = 1.10 \text{ min}$$

Además tenemos:

$$\begin{array}{rcl} T_{med} & = & 0.00 \text{ min} \\ T_{mon} & = & 0.00 \text{ min} \\ T_{desp} & = & 0.75 \text{ min} \\ T_{otros} & = & 0.00 \text{ min} \\ \hline T_{i_{tal}} & = & 0.75 \text{ min} \end{array}$$

Obtenemos un tiempo de taladrado igual a:

$$T_{e_{tal}} = 1.85 \text{ min}$$

El tiempo total de ejecución de la pieza completa considerando ranura y agujeros resulta:

$$T_e = 5.87 \text{ min}$$

#### 6.3.4 Costo de la herramienta (CHerr)

Este costo está dado por el costo de suministro de una fresa afilada (CF) dividido entre el número piezas que se pueden maquinar con una misma fresa (NP).

$$C_{Herr} = \frac{CF}{NP}$$

Cálculo del costo de suministro de una herramienta afilada ( $C_f$ )

Consideramos que la máquina automatizada empleará cuchillas de carburo. Por lo tanto:

$$C_{Fresa} = 30.0 \text{ \$ (Fresa con cuchillas de carburo)}$$

$$C_{Af} = 0.0 \text{ \$/fresa}$$

$$N_{Af} = 1 \text{ Afiladas/fresa}$$

Reemplazando en la ecuación (6.10) obtenemos:

$$C_f = 30 \text{ \$/fresa}$$

### Cálculo de Número de Piezas por fresa (NP)

Para calcular el NP según la ecuación (6.11) debemos calcular el tiempo de vida de la herramienta y el tiempo de ejecución de una pieza para las condiciones de velocidad de corte seleccionadas.

Procedemos de forma similar al caso anterior, es decir, hacemos el cálculo por separado para el ranurado y taladrado como si fueran piezas distintas.

Empezaremos el cálculo para la ranura central.

La velocidad óptima de corte puede obtenerse mediante la ecuación (6.12).

Los datos son los siguientes:

$$V_r = 9.83 \text{ m/s}$$

$$t_r = 1 \text{ minuto}$$

$$n = 0.25 \text{ (cuchilla de carburo)}$$

$$t_{ct} = 1.0 \text{ minuto}$$

$$Q = 0.5 \text{ } (\theta = \pi)$$

Reemplazando obtenemos:

$$V_{\text{óptima}} = 2.223 \text{ m/s}$$

La velocidad de giro del cabezal la hallamos de la velocidad de corte y el diámetro de la fresa.

$$\text{RPM}_{\text{óptima}} = 4245 \text{ RPM}$$

Como la fresadora automatizada dispone de una amplia gama de velocidades escogemos la más cercana:

$$\text{RPMselecc} = 2000 \text{ RPM}$$

Recalculamos la velocidad de corte:

$$V_{\text{corte}} = 1.047 \text{ m/s}$$

Ahora calcularemos mediante la ecuación de Taylor, el tiempo de vida para la velocidad de corte seleccionada. Recordando la ecuación

$$t_{\text{vida}} = t_r \cdot \left( \frac{V_r}{V_{\text{corte}}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$t_{\text{vida}} = 15339 \text{ min}$$

Reemplazamos en la fórmula (6.11) y obtenemos:

$$N_{\text{Pranura}} = 6817 \text{ piezas/fresa}$$

Realizando los mismos cálculos para los 4 agujeros de la pieza tenemos los siguientes resultados:

$$V_{\text{óptima}} = 1.8692 \text{ m/s}$$

$$\text{RPM}_{\text{óptima}} = 3569 \text{ RPM}$$

Escogiendo la velocidad más cercana y recalculando la velocidad de corte:

$$\text{RPMselec} = 2000 \text{ RPM}$$

$$V_{\text{corte}} = 1.047 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{vida}} = 7559 \text{ min}$$

El número de piezas será:

$$N_{\text{P}taladrado} = 6972 \text{ piezas/fresa}$$

El número de piezas incluyendo ranuras y taladrados la hallamos de la ecuación (6.15).

$$NP = 3446 \text{ piezas/fresa}$$

Evaluando la ecuación (6.9) tendremos:

$$C_{herr} = 0.0087 \text{ \$/pieza}$$

Finalmente podemos calcular el costo de manufactura por pieza para la fresadora automatizada.

Reemplazando en la ecuación (6.1) obtenemos:

$$C_{manuf} = 1.411 \text{ \$/pieza}$$

#### 6.4 Costo total de producción

Habiendo calculado los costos de manufactura de una pieza típica en los tres tipos de fresadora vertical analizados, debemos calcular el costo total considerando también el costo fijo de producción que comprende las horas de preparación de la máquina para producir el lote de piezas determinado.

$$CostoTotal = CostoFijo + CostoVariable \quad \dots(6.15)$$

$$CostoTotal = C_h \times T_p + C_{manuf} \times N_{piezas} \quad \dots(6.16)$$

donde:  $T_p$  = tiempo de preparación de máquina

$T_p$  = 10 min para fresadora convencional

$T_p$  = 30 min para fresadora automatizada

$T_p$  = 25 min para fresadora C.N.C.

$N_{piezas}$  = número de piezas del lote

Haciendo  $A_0 = C_h \cdot T_p$  y  $A = C_{manuf}$  obtenemos la ecuación de una recta:

$$CT = A_0 + A \times N \quad \dots(6.17)$$

Para la fresadora convencional se tiene:

$$A_o = 0.40 \$$$

$$A = 1.43 \$/pieza$$

Para la fresadora automatizada:

$$B_o = 2.39 \$$$

$$B = 1.413 \$/pieza$$

Para la fresadora C.N.C.:

$$C_o = 2.99 \$$$

$$C = 1.411 \$/pieza$$

Luego, el punto de intersección entre las rectas de la fresadora convencional y la automatizada se obtiene con:

$$N_{piezas} = \frac{(B_o - A_o)}{(A - B)} \quad \dots(6.18)$$

reemplazando datos obtenemos:

$$N_{Piezas} = 110 \text{ piezas}$$

Es decir, a partir de 110 piezas de este tipo resulta más económico producir en la máquina automatizada.

Por otro lado, el punto de intersección entre una máquina C.N.C. y una convencional se da para 125 piezas.

Por último, entre una fresadora automatizada y una C.N.C. resulta rentable usar una C.N.C para lotes mayores a 290 piezas.

Podemos hacer una gráfica mostrando las tres rectas que nos dan el costo total respecto a un número de piezas del lote.

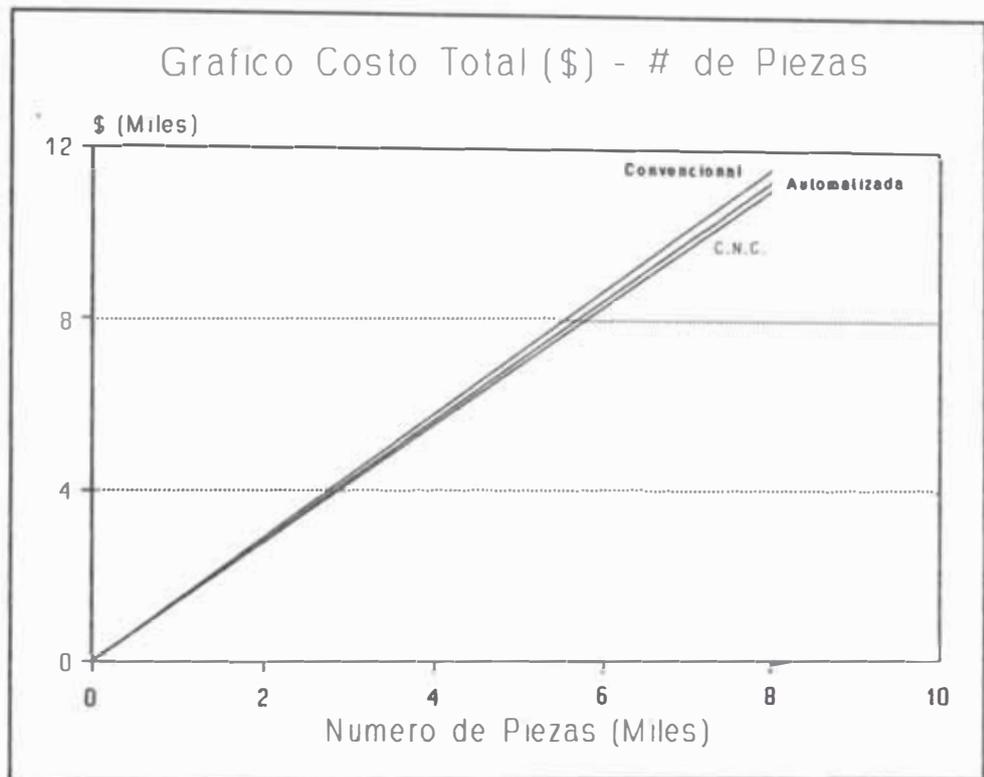


Figura 6-2

Si la ecuación del costo total lo dividimos entre el número de piezas del lote podemos obtener las curvas mostradas en el próximo gráfico.

En dicho gráfico se nota principalmente que para pocas piezas no resulta conveniente ni una máquina automatizada ni una C.N.C. En cambio para lotes medianos resulta rentable la máquina automatizada, y para lotes mayores se puede optar por una máquina C.N.C.

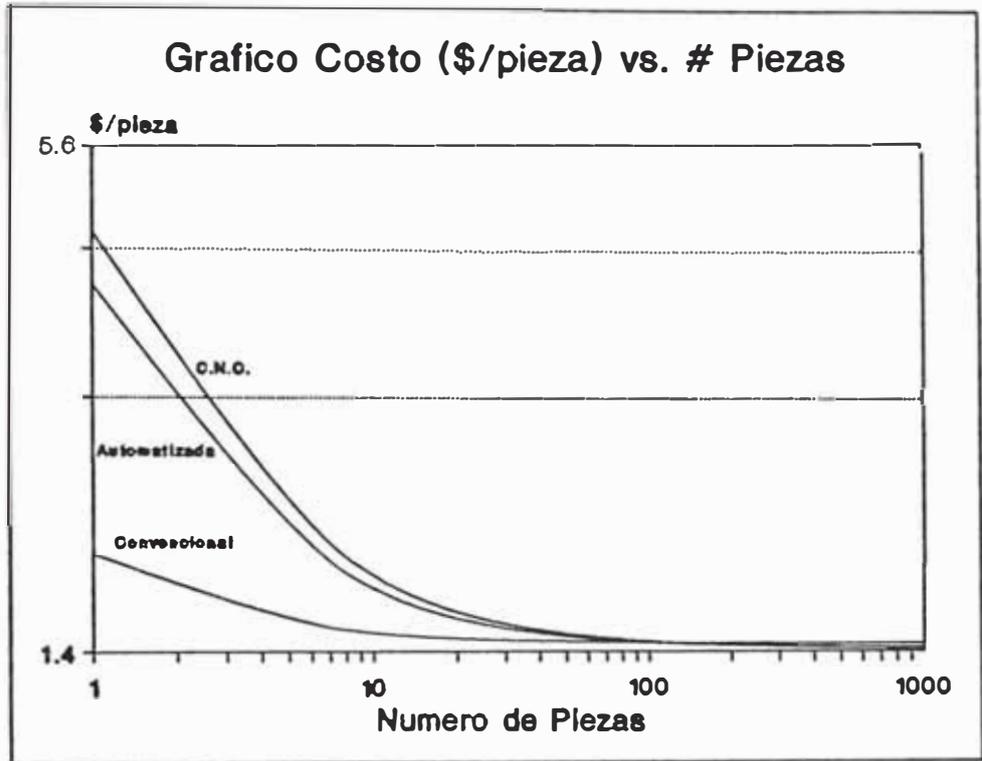


Figura 6-3

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) Para conseguir una velocidad alta en los motores de paso se recomienda proveer a estos del circuito chopper o del circuito de forzamiento de corriente que son los métodos más eficaces para un aumento rápido de la corriente en cada bobina del motor. Con esto se pueden lograr velocidades por encima de 2000 pulsos por segundo sin pérdida de sincronismo.
  
- 2) El circuito controlador de velocidad diseñado para el motor de corriente continua que hace girar el husillo, es del tipo proporcional. En las pruebas que se hicieron, se notó que este tipo de control sólo funciona adecuadamente cuando las variaciones de carga son pequeñas. Se deja para un estudio futuro la aplicación de controladores proporcionales-derivativos (PI) o incluso proporcionales-derivativos-integrativos (PID) ya que, aún cuando éstos son más difíciles de implementar, son más adecuados en donde los cambios de carga en el motor son grandes y rápidos.
  
- 3) Para lograr un buen resultado en el posicionado de los

carros de la fresadora se puede hacer de dos formas.

La primera de ellas es colocando una regleta graduada a lo largo de cada carro y diseñar un circuito de realimentación que nos devuelva las coordenadas relativas o absolutas de la regleta con respecto al carro desplazado. Estas regletas proveen una resolución de hasta 0.001 mm. Si hubiese un error se corregirá de inmediato.

La otra posibilidad es reemplazar el tornillo de los carros por un husillo de bolas, siempre que sea posible, para reducir drásticamente la fricción en el desplazamiento del carro y eliminar las holguras inherentes a toda máquina convencional. Así se puede usar el mismo sistema de bucle abierto utilizado en este proyecto en el control de los motores de paso, sin temor a perder precisión en el posicionamiento.

- 4) En la máquina automatizada se reduce bastante los tiempos en la fabricación de una pieza al no tener que hacer mediciones intermedias. Por otro lado, los errores se reducen considerablemente, y la precisión en las medidas y el acabado mejoran notablemente.
- 5) El programa del módulo CAM permite preparar las órdenes de CNC para distintas piezas a fabricar, simularlas gráficamente y verificar su correcto funcionamiento en la máquina. Esto permite disminuir el tiempo de parada de la máquina al pasar de la fabricación de una pieza a otra.

- 6) La fresadora automatizada con CNC representa una alternativa de producción con la que se obtendrá un costo menor en la producción, y mayor calidad del producto. Sin embargo, lo anterior es cierto solo en el caso de producción de lotes medianos de piezas, puesto que la inversión de la fresadora automatizada más el tiempo que toma la preparación de la máquina para cada tipo de pieza es considerablemente mayor que la convencional. La elección de una u otra máquina estará en función del tipo y número de piezas a fabricar.
  
- 7) El diseño del circuito que se encarga de controlar la frecuencia y número de pulsos de cada uno de los 3 motores de paso utilizando los temporizadores/contadores programables (CI 8253) resultó satisfactorio ya que se logra hacer girar a los motores, y por consiguiente, desplazar los carros en forma precisa y simultánea. Gracias a esto, la pieza con respecto a la herramienta puede describir trayectorias lineales en el espacio y trayectorias circulares en el plano.

## BIBLIOGRAFIA

1. Angulo, J.M., "Electrónica Digital Moderna", Paraninfo, 1989.
2. Angulo, José María, "Aplicaciones prácticas de microprocesadores", Paraninfo, 1987.
3. Astudillo Jiménez, Fidel, "Máquinas herramientas, Organización y Sistemas", Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., 1983.
4. Baumeister, T, Avallone, E, Baumeister III, T, "Marks Manual del Ingeniero Mecánico", McGraw-Hill, 1984.
5. Bautz, "Schrittmotoren - Synchronmotoren", 1990.
6. Beer, F.P., Johnston Jr, E.R., "Mecánica Vectorial para Ingenieros", McGraw-Hill, 1981.
7. Boehler, "Manual de aceros Boehler del Perú", 1985.
8. Boothroyd, Geoffrey, "Fundamentos del corte de metales de las máquinas herramientas", Ed. McGraw-Hill, 1978.
9. Dunteman, Jeff, "La Biblia del Turbo Pascal", Ed. Anaya Multimedia, S.A., 1989.
10. Encyclopedia Britannica, Encyclopedia Britannica Inc., 1968
11. Gates, "PowerGrip Timing Belt Systems for Industrial Drives", The Gates Rubber Company, 1988.
12. Gerling, H., "Alrededor de las Máquinas Herramientas", Ed. Reverté, S.A., 1987.
13. Hori, Juan, "Diseño de elementos de Máquinas", CEFIM, 1988.
14. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, "High-Performance Translator for a High-Torque PM Stepping Motor", Vol. IECI-25, No.4, Nov 1978.

15. Intartaglia, R. Lecoq, P., "Guía del control numérico de máquinas herramienta", Ed. Paraninfo, 1989.
16. Jiménez Vargas Machuca, Jorge, "Construcción y pruebas de un prototipo graficador X- $\emptyset$ ", Tesis Univ. Católica del Perú, 1989.
17. Kibbe, Richard, "Prácticas de taller de Máquinas Herramientas", Impresiones Editoriales S.A., 1985.
18. Koenisberger, F., "Machine tools structures", 1970.
19. McComb, Gordon, "The robot builder's bonanza", Tab Books Inc., 1987.
20. Philips, Data HandBook "Electronic Components and Materials", Book C 17, 1984.
21. Philips, "ECG Semiconductors Master Replacement Guide", Philips ECG, 1991.
22. Redondo Ibáñez, José, "Máquinas herramientas con control numérico", 1969.
23. Sandvik Coromant, "Fresado", C-5300:013/1-SPA, AB Sandvikens Tryckeri, 1987.
24. Shigley, J., "Diseño en ingeniería mecánica", 1985
25. Solar, Z.C., "Problemas de tecnología de la fresadora"
26. Tokheim, Roger L., "Principios Digitales", McGraw-Hill, 1982.
28. Venero B., A., "Introducción al Análisis Matemático", 1983.