

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



***“Sistema de control numérico computarizado para corte de poliestireno expandido (EPS)”***

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Daniel Marín Calderón**

**Cartago, Noviembre de 2010**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniería Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**Miembros del Tribunal**



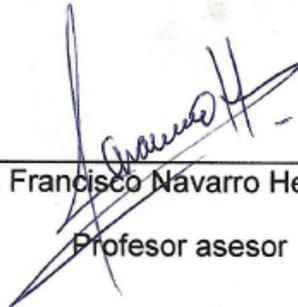
Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor lector



Ing. Francisco Navarro Henríquez

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Jueves 25 de noviembre de 2010

## **Declaratoria de Autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 12 de Noviembre de 2010



---

Daniel Marín Calderón  
Cédula 4-0184-0104

## Resumen

El poliestireno expandido o EPS es un material muy utilizado en la actualidad, con usos que van desde envases de comida hasta rotulación. Tanto en la industria como en labores informales se utiliza la técnica de corte de EPS con hilo calentado para darle una forma determinada, existen herramientas tanto manuales como automáticas para el corte de poliestireno expandido.

La oferta de máquinas de corte automatizadas no ha sido satisfactoria entre las empresas de Costa Rica. Inconvenientes que van desde el servicio técnico hasta el tiempo de entrega son factores que han afectado a los clientes. La empresa Digicontrol S.A. busca plantear una alternativa con el diseño de un prototipo de control CNC para brindar soporte a las empresas del área.

El presente proyecto plantea el diseño y desarrollo del sistema de control para una máquina de corte con EPS, el cual incorpora un estudio técnico de las variables que influyen en el proceso de corte.

El diseño se compone de tres módulos principales: Control de la potencia en el hilo de corte, control de los ejes de movimiento y comunicación con la computadora, empleando en éste último una interfaz gráfica para la interacción con el usuario.

Palabras Claves: EPS, Hilo de corte, CNC, HPGL, velocidad de corte, potencia de calentamiento.

## **Abstract**

Expanded polystyrene or EPS is a material widely used nowadays, with uses ranging from food packaging to labeling. Both the industry and informal work uses the hot wire cutting technique to cut EPS and give it a determined shape, there are manual and automatic tools for the cut with expanded polystyrene.

The offer of automated cutting machines hasn't been satisfactory among the companies of Costa Rica. Disadvantages ranging from service until the delivery time are factors that have affected customers. The company Digicontrol S.A. seeks to propose an alternative with the design of a prototype CNC control to provide support to the companies in the area.

This project raises the design and development of a control system for EPS cutting machine, which incorporates a technical study of the variables that influence the cutting process.

The design consists of three main modules: power control in the cutting wire, control of the movement axis and communication with the computer, in the latter using a graphical interface for user interaction.

Keywords: EPS, hot wire cutting, CNC, HPGL, cutting speed, heating power.

## **Dedicatoria**

A Dios:

*Padre santo, de quien he recibido la vida, me ha cuidado,  
me ha guiado, nada debo temer porque estarás a mi lado, gracias.*

A mi madre:

*Mas que una madre, una amiga, una mentora,  
la que está siempre al pie del cañón para apoyarme,  
este triunfo se lo dedico a ti.*

A mi hermana y mi padre:

*Quienes siempre me apoyan en todo momento y me brindan su amor  
incondicional, gracias.*

## **Agradecimiento**

*Al Licenciado Raúl Álvarez Araya por haberme dado la oportunidad y haberme brindado su apoyo.*

*A mis profesores, de quienes aprendí más allá de lo meramente teórico.*

*Y a mis compañeros de carrera, con quienes compartí alegrías y tristezas.*

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1:	Introducción .....	1
1.1	Problema existente e importancia de su solución.....	1
1.2	Solución seleccionada .....	4
Capítulo 2:	Meta y objetivos .....	7
2.1	Meta.....	7
2.2	Objetivo general.....	7
2.3	Objetivos específicos .....	7
2.3.1	Objetivos de hardware .....	7
2.3.2	Objetivos de software .....	8
2.3.3	Objetivos de implementación .....	8
Capítulo 3:	Marco teórico.....	9
3.1	Descripción del sistema o proceso a manejar .....	9
3.2	Antecedentes bibliográficos .....	12
3.2.1	El Poliestireno Expandido .....	12
3.2.2	Los hilos de Nicromo .....	14
3.2.3	Modelo matemático para la distribución de calor.....	16
3.2.4	Control de motores paso-a-paso unipolares.....	18
3.2.5	El formato de archivo HPGL .....	20
3.2.6	Librerías JAVA.....	22
3.3	Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema. ....	23
3.3.1	Teoría básica del hilo de corte .....	24
3.3.2	Teoría básica de los motores paso-a-paso .....	25
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico.....	29
4.1	Reconocimiento y definición del problema.....	29
4.2	Obtención y análisis de la información .....	30
4.2.1	Visita a empresas .....	30
4.2.2	Estudio de máquinas CNC existentes y temas relacionados ....	31
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución .....	32
4.4	Implementación de la solución.....	33
4.5	Reevaluación y rediseño.....	34
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución .....	36
5.1	Análisis de soluciones y selección final.....	36
5.2	Descripción del hardware .....	42
5.3	Descripción del software .....	50
Capítulo 6:	Análisis de resultados .....	77
6.1	Resultados .....	77
6.2	Análisis de resultados.....	86
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones .....	89
7.1	Conclusiones .....	89
7.2	Recomendaciones .....	90
Capítulo 8:	Bibliografía .....	91
Apéndices.....		93
Apéndice A.1	Glosario, Abreviaturas y Simbología. ....	93
Apéndice A.2	Cálculos de las protecciones di/dt y dV/dt para el SCR ST230C16C0.....	96

<b>Anexos .....</b>	<b>98</b>
<b>Anexo B.1 Driver THD-1801B.....</b>	<b>98</b>
<b>Anexo B.2 Driver SLA7026M.....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo B.3 Microcontrolador PIC16F877.....</b>	<b>100</b>
<b>Anexo B.4 SCR ST230C12C1.....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Diagrama de bloques de una maquina de corte CNC.....	2
<b>Figura 1.2</b>	Diagrama de partes que componen la solución. ....	6
<b>Figura 3.1</b>	Contorno de esquineros a cortar en una máquina CNC.....	9
<b>Figura 3.2</b>	Vista frontal de la máquina CNC [1]. ....	10
<b>Figura 3.3</b>	Diagrama de flujo del proceso.....	11
<b>Figura 3.4</b>	Diagrama de flujo del algoritmo de corte.....	12
<b>Figura 3.5</b>	Figuras hechas de poliestireno expandido [1]. ....	13
<b>Figura 3.6</b>	Condiciones de frontera para la resolución de la ecuación de calor.17	
<b>Figura 3.7</b>	Motores paso-a-paso (A) de 6 hilos y (B) de 5 hilos.....	18
<b>Figura 3.8</b>	Control de fases de un motor paso-a-paso unipolar.....	20
<b>Figura 3.9</b>	Desplazamiento. (A) Absoluto; (B) Relativo. ....	22
<b>Figura 3.10</b>	Conexión sugerida por el fabricante para el SLA7026M. ....	27
<b>Figura 4.1</b>	Visita a la empresa IPAK FGP S.A. (A) Esquineros hechos con EPS. (B) Máquina CNC con avería. ....	31
<b>Figura 5.1</b>	Diagrama de bloques de la etapa de control para el hilo de corte. ..	42
<b>Figura 5.2</b>	Diagrama eléctrico de la etapa de sincronización. ....	43
<b>Figura 5.3</b>	Diagrama eléctrico del detector de cruce por cero y el generador diente de sierra. ....	44
<b>Figura 5.4</b>	Diagrama eléctrico del generador de PWM.....	45
<b>Figura 5.5</b>	Diagrama eléctrico para la etapa de disparo y regulación de voltaje. .....	46
<b>Figura 5.6</b>	Acondicionador de señal para el sensor de HALL.....	47
<b>Figura 5.7</b>	Diagrama de bloques propuesto para la sección 5.2.2. ....	48
<b>Figura 5.8</b>	Conexión eléctrica en el driver THD-1801B. ....	49
<b>Figura 5.9</b>	Diagrama de conexión del driver SLA7026M. ....	50
<b>Figura 5.10</b>	Diagrama de flujo para diseño inicial de programa. ....	51
<b>Figura 5.11</b>	Interfaz gráfica del programa de prueba 3. ....	54
<b>Figura 5.12</b>	(a) Ejemplo de un fragmento de archivo HPGL. (b) Representación de la información del archivo.....	55
<b>Figura 5.13</b>	(a) Lista de puntos reordenados según las reglas de corte. (b) Representación de la ruta a seguir por el hilo de corte. ....	57
<b>Figura 5.14</b>	Diagrama de flujo para el algoritmo “Punto mas cercano” .....	58
<b>Figura 5.15</b>	Diagrama de flujo para algoritmo de “OrdenCW” .....	59
<b>Figura 5.16</b>	Diagrama de flujo para el algoritmo “Análisis de Figuras” .....	61
<b>Figura 5.17</b>	Diagrama de flujo para el algoritmo “simulación de corte”. ....	63
<b>Figura 5.18</b>	(A) Despliegue en pantalla de las figuras sin aplicar los algoritmos. (B) Figuras en pantalla junto con las líneas de salto obtenidas. ....	64
<b>Figura 5.19</b>	Interfaz gráfica del control manual. ....	66
<b>Figura 5.20</b>	Estructura de la trama de comunicación. ....	67
<b>Figura 5.21</b>	Diagrama de flujo para el programa principal del microcontrolador. .....	69
<b>Figura 5.22</b>	Diagrama de flujo para la secuencia de HOME.....	70
<b>Figura 5.23</b>	Diagrama de flujo para la interrupción del “TIMER0”. ....	71
<b>Figura 5.24</b>	Diagrama de flujo para el comando FR.....	72
<b>Figura 5.25</b>	Diagrama de flujo para comando PO. ....	73
<b>Figura 5.26</b>	Diagrama de flujo para el algoritmo de estado del hilo de corte.....	75

<b>Figura 5.27</b>	Formas de onda. (A) Señal de alimentación. (B) Señal del sensor.	75
<b>Figura 6.1</b>	Forma de onda del rectificador de onda completa.	78
<b>Figura 6.2</b>	Forma de onda del detector de cruce por cero.	78
<b>Figura 6.3</b>	Forma de onda del integrador	79
<b>Figura 6.4</b>	Forma de onda del generador PWM.	79
<b>Figura 6.5</b>	Forma de onda de la señal pulsante en la salida del temporizador.	79
<b>Figura 6.6</b>	Forma de onda en el primario del transformador con el ciclo de trabajo al mínimo.	80
<b>Figura 6.7</b>	Forma de onda en el primario del transformador al 20% de su capacidad.	81
<b>Figura 6.8</b>	Prueba de comunicación PC-Control.	82
<b>Figura 6.9</b>	Microcontrolador junto con puente USB-UART.	82
<b>Figura 6.10</b>	Motor con su respectivo driver.	84
<b>Figura 6.11</b>	Marca de referencia utilizada para medir el desplazamiento	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Resumen de propiedades físicas del EPS.....	13
<b>Tabla 3.2</b>	Comparación de propiedades físicas del EPS según marca. ....	14
<b>Tabla 3.3</b>	Resistencia eléctrica de hilos de Nicromo a 20°C.....	15
<b>Tabla 3.4</b>	Corriente vs temperatura para el Nicromo 60(C). ....	16
<b>Tabla 3.5</b>	Secuencia de activación de fases en “full step”. ....	19
<b>Tabla 3.6</b>	Descripción de algunos comandos HPGL. ....	21
<b>Tabla 5.1</b>	Descripción del buffer implementado.....	53
<b>Tabla 5.2</b>	Estructura de “buffer_pr”.....	53
<b>Tabla 5.3</b>	Estructura de “temporal”.....	60
<b>Tabla 5.4</b>	Estructura de “temporal2”.....	62
<b>Tabla 6.1</b>	Mediciones hechas en el circuito de control de potencia. ....	81

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1 Problema existente e importancia de su solución**

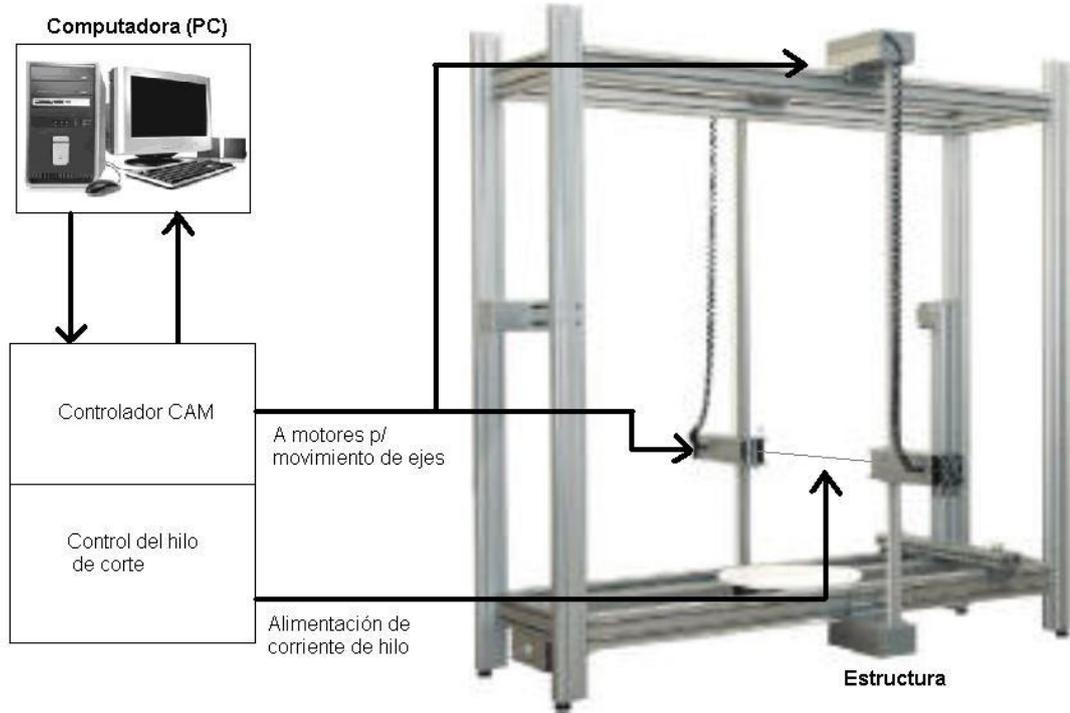
El poliestireno expandido (EPS, por sus siglas en inglés) es un polímero que se ha empleado para diversas aplicaciones, sus usos van desde embalajes hasta rotulación. Suele ser muy utilizado en el sector construcción por sus propiedades físicas particulares, cuando suele ser recubierto con concreto le brinda mayor dureza.

Existen dos métodos para darle al EPS una forma determinada. El primer método es teniendo los compuestos del poliestireno (es decir, sin ser todavía poliestireno expandido) y son contenidos en cámaras de moldeo donde se le aplica energía térmica para generar el proceso de expansión y así cubrir todo el molde.

El otro método es con un bloque de EPS el cual es “cortado” mediante un hilo caliente de forma cilíndrica que va sublimando el material, con el fin de darle la forma que se requiere. El hilo se calienta al aplicarle una corriente eléctrica entre sus extremos, y según el caso el hilo es tensado para cortes rectos, o bien se le da forma para generar diferentes texturas. Existe cortes en dos dimensiones, donde el hilo se tensa a lo largo del eje Z mientras que es desplazado a lo largo de los ejes X y Y, e incluso cortes en tres dimensiones donde se utiliza un torno o mesa giratoria para desplazar el bloque en un eje angular.

En el mercado se cuenta con herramientas tanto profesionales como rudimentarias para corte de EPS con hilo caliente, según el costo y la aplicación. Existen cortadoras de mano para cortes manuales, se aplica en casos de hobby (estructuras para aviones a control remoto) o para uso ocasional. En la industria se utilizan estructuras robustas para el manejo manual o automático del hilo de corte, las máquinas de corte automático suelen ser de control numérico computarizado (CNC) donde se dispone de una computadora (PC) con software CAD (“Computer Aided Design”) para el diseño de la forma o figura en formato digital, y software CAM (“Computer Aided Manufacturing”) para el control de la

máquina, transformación de la figura a movimientos de los ejes. A continuación se muestra un diagrama de bloques de éste tipo de máquinas.



**Figura 1.1** Diagrama de bloques de una maquina de corte CNC

Los hilos de corte empleados en dichas máquinas suelen ser de algún metal o aleación capaz de generar mucha energía térmica en función de la corriente eléctrica aplicada, algunos ejemplos son el Nicromo (aleación de Níquel-Cromo) o aleaciones de titanio. El material y el calibre (AWG) del hilo a utilizar se determinan en función de las especificaciones de temperatura, precisión y velocidad de corte requeridas, dado que la mayor o menor medida de cada parámetro afecta significativamente otras propiedades, con sus ventajas y desventajas. En la práctica el operario varía los parámetros en forma empírica hasta encontrar los valores que mejor se ajustan a su necesidad.

Una medida de seguridad a la hora de emplear cortadoras de poliestireno es no calentar el hilo con una temperatura superior al orden de los 400 - 500 grados Celsius (varia según la fabricación y composición química) debido a que en esa temperatura los productos derivados de la sublimación del EPS tienden a la combustión, en algunos casos sin necesidad de llama.

Otra medida de seguridad es que el operario debe mantenerse fuera de la estructura y no debe acercarse a la máquina cuando el hilo está caliente y cuando está en movimiento, con el fin de evitar accidentes.

La empresa Digicontrol S.A. ha brindado servicios de mantenimiento y soporte a empresas confeccionadoras de perfiles y rótulos hechos con EPS para el sector construcción, algunos ejemplos son: ONIX Costa Rica, IPAK FGP S.A., PanaCor S.A. y Red Nacional de Frio.

Dichas empresas emplean máquinas cortadoras de EPS tanto manuales como automáticas (tipo CNC), sin embargo, las máquinas tipo CNC disponibles en el mercado presentan ciertos inconvenientes:

- A. Los principales fabricantes son de origen europeo y estadounidense, si se requiere conseguir una máquina debe ser importada del extranjero, una cortadora tipo CNC con las dimensiones requeridas suele ser muy costoso e incluso el tiempo de entrega es de un lapso muy prolongado, lo que lo hace poco viable. El soporte técnico es muy limitado, si se requiere un repuesto también debe ser importado.
- B. El software CAD utilizado para el diseño de las figuras a cortar (como Corel Draw o AutoCAD) es muy complejo para éste tipo de CNC, donde sólo se necesita definir el contorno de la figura. Además este tipo de software consume muchos de los recursos de una computadora (memoria RAM, capacidad de procesamiento), y su uso se limita a personas con conocimientos previos en el uso de la herramienta.
- C. La gran mayoría de éstas máquinas trabajan con comunicación hacia la computadora por medio de puerto serie o paralelo, tecnologías que actualmente vienen siendo sustituidas por el puerto USB, lo cual significa que la evolución tecnológica de este tipo de máquinas es muy lento, y dificulta la sustitución de la computadora en caso de algún fallo. Los modelos que emplean USB para la comunicación son modelos muy exclusivos.

Al finalizar el proyecto, se obtendrá el prototipo de un control para una máquina cortadora de EPS con las siguientes ventajas:

- A. El sistema de control de la máquina podrá ser conectado a la PC por medio de un puerto USB, en vez de un puerto serial o un puerto paralelo.
- B. En el software para el manejo de la máquina, se tendrá tanto control manual (movimientos comandados directamente por usuario) como también control automático (movimientos generados a partir de una figura digital prediseñada a escala).
- C. El control automático del hilo de corte estará configurado a partir de los parámetros: potencia del hilo de corte y velocidad de corte. El usuario deberá ajustar dichos parámetros de forma manual.

## **1.2 Solución seleccionada**

Previamente al planteamiento de una posible solución, Digicontrol S.A. en común acuerdo con las empresas interesadas plantearon las siguientes restricciones de diseño:

- A. El diseño del control de la máquina debe orientarse a la fabricación de figuras con un “espacio de corte” máximo de 0,5mm (+/- 0,1mm) y una “incertidumbre de corte” máxima de +/-0,5mm, ver definiciones en el Apéndice A.1.
- B. Dado que el diseño requiere que la máquina tenga comunicación con una computadora, dicha comunicación debe ser a través de un periférico que sea moderno y que posea la mayoría de las computadoras comerciales disponibles en el mercado (se acordó puerto USB), se busca eliminar el uso de puerto serial o paralelo.
- C. La herramienta para el manejo de la máquina debe ser lo más sencillo posible, se busca que cualquier usuario lo pueda utilizar con unas cuantas explicaciones.

La solución propuesta se enfoca en los elementos de la figura 1.1, excepto la estructura que será un elemento que deberá brindar el cliente. En esta etapa se desarrollará solamente el mecanismo de control para corte bidimensional con el uso adicional de mesa giratoria, pero en un futuro se podría extender al desarrollo de software especializado en tres dimensiones y la funcionalidad de “Router” para generar relieves.

Dado que la estructura para hacer las pruebas aún se encuentra en proceso de construcción, ésta etapa del proyecto se enfocará sólo en la parte electrónica, por lo que sólo se abarcará la parte de investigación y se implementarán todos los elementos de control sin que todavía sean acoplados a la estructura.

También, al inicio del proyecto se planteó que dentro de la solución se incluyera el desarrollo de un software CAD acorde con las necesidades del cliente, sin embargo se acordó dejar por fuera de la solución final porque requería extender el tiempo para la ejecución del proyecto, por lo que el desarrollo del software CAD queda por implementarse de forma extraoficial.

Como aspecto innovador se planteará el diseño de la etapa para controlar la potencia del hilo de corte pero tomando en cuenta el estudio de los parámetros que afectan significativamente el desempeño del hilo, a fin de determinar por un lado el rango de diámetros de hilo apropiados para el uso, y por otro lado los rangos de temperatura de corte con que se pueden trabajar, según el diámetro. El estudio estará basado en los hilos de Nicromo por ser de bajo costo y de mayor uso comercial. Eventualmente, cuando los elementos de control puedan ser incorporados a la estructura, se realizarán estudios experimentales para determinar el rango de velocidades de corte apropiados.

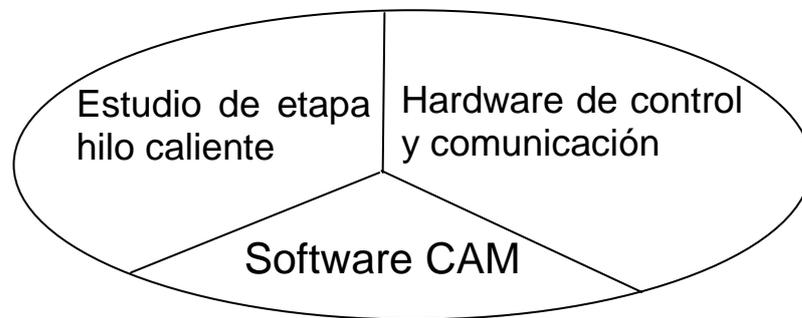
La etapa de potencia del hilo estará aparte de la etapa de control, proveniente de la tarjeta controladora de los motores paso a paso. Ésta última será la que tendrá comunicación con la computadora por medio de un puerto USB, consistirá en un microcontrolador que recibirá las coordenadas de movimiento de los ejes desde la PC para así dirigir los motores paso a paso (con

sus respectivos drivers) a lo largo de la trayectoria propuesta. El diseño será para el movimiento a través de 2 ejes: el eje X y el eje Y.

En la computadora se tendrá un software CAM que hará una interpretación del archivo de trazado en formato HPGL (extensión “.plt”) para enviarle órdenes a la tarjeta de control y así poner la máquina en movimiento. En esta parte tendrá un apartado para el movimiento manual de la máquina, definiendo dirección y velocidad de movimiento, e incluso establecer la potencia del hilo de corte.

El trazado hecho en formato de archivo HPGL (extensión “.plt”) permitirá abrir los archivos hechos con otra herramienta de diseño a conveniencia del usuario, como Corel Draw; tras un estudio de viabilidad se encontró que éste formato es sencillo y no convertirá al programa en una herramienta que consuma muchos recursos de la PC.

La siguiente figura muestra un diagrama con las partes que componen la solución propuesta.



**Figura 1.2** Diagrama de partes que componen la solución.

## **Capítulo 2: Meta y objetivos**

### **2.1 Meta**

Indicador: Cumplimiento de los criterios descritos de la herramienta (¿Cumplen? Si / No).

Contar con una herramienta para corte de bloques de poliestireno expandido, de diseño y producción nacional, con la capacidad de realizar figuras tridimensionales con o sin relieve mediante software de diseño y control numérico, y con comunicación a una computadora mediante puerto USB.

### **2.2 Objetivo general**

Indicador: Cumplimiento de los criterios descritos de la máquina (¿Cumplen? Si / No).

Desarrollar el control de una nueva máquina cortadora de poliestireno expandido, capaz de realizar cortes mediante uso de hilo de nicromo calentado a lo largo de un eje bidimensional en forma automática, con software de control CAM y con comunicación entre la máquina y una PC por medio de puerto USB.

### **2.3 Objetivos específicos**

#### **2.3.1 Objetivos de hardware**

1. Diseñar el sistema de control de la máquina, éste debe integrar los drivers para el control de los motores paso a paso que se encargan de desplazar el hilo de corte a través de un eje bidimensional XY.
2. Diseñar la etapa para controlar la potencia del hilo de corte, el diseño estará basado en las conclusiones obtenidas de la investigación descrita en el punto 1 de los Objetivos de Implementación.
3. Incorporar al diseño del sistema de control el hardware necesario para la comunicación entre dicho sistema y la PC a través de puerto USB.

### **2.3.2 Objetivos de software**

1. Elaborar el programa para el microcontrolador que gobernará el sistema de control, basado en los requerimientos de funcionalidad del Hardware.
2. Elaborar el programa para la interfaz de usuario con el control de la máquina (control CAM), donde se especifica el archivo con la forma a cortar.
3. Elaborar dentro del programa anterior, una sección para el movimiento manual de la máquina, el usuario podrá hacer movimientos del eje X, Y y Z (mesa giratoria), además podrá ajustar la potencia del hilo de corte.

### **2.3.3 Objetivos de implementación**

1. Determinar de forma teórica el rango de valores de diámetro de hilo de Nicromo y temperatura de corte, con el fin de cumplir que el espacio de corte máximo sea de 0,5mm (+/- 0,1mm) y que el hilo cuente con la suficiente resistencia mecánica para evitar que se rompa<sup>1</sup>.
2. Implementar y ensamblar todos los elementos de control de la máquina, acorde con los objetivos específicos de hardware y software.
3. Hacer pruebas de funcionamiento que comprueban que el objetivo general se cumplió.

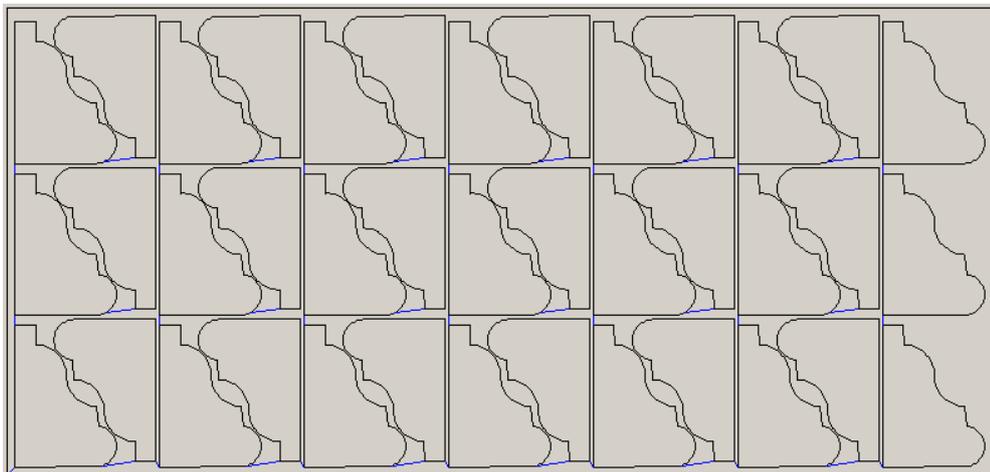
---

<sup>1</sup> Ver anexo para definición de "Espacio de Corte".

## Capítulo 3: Marco teórico

### 3.1 Descripción del sistema o proceso a manejar

Por lo general, el procedimiento para elaborar una figura a base de EPS utilizando una máquina CNC comienza por la elaboración de la(s) figura(s) en software CAD, la mayoría de las máquinas CNC utilizan software especializado para el diseño CAD, como es el caso de AutoCAD o Corel Draw. La figura diseñada en dos dimensiones suele ser muy sencilla: sólo las líneas o contornos, a escala, sin relleno ni otra información relevante. Se busca siempre generar repeticiones de la misma figura de manera que se aproveche todo el espacio del bloque de EPS y no desperdiciar material, como ejemplo se presenta la siguiente figura.



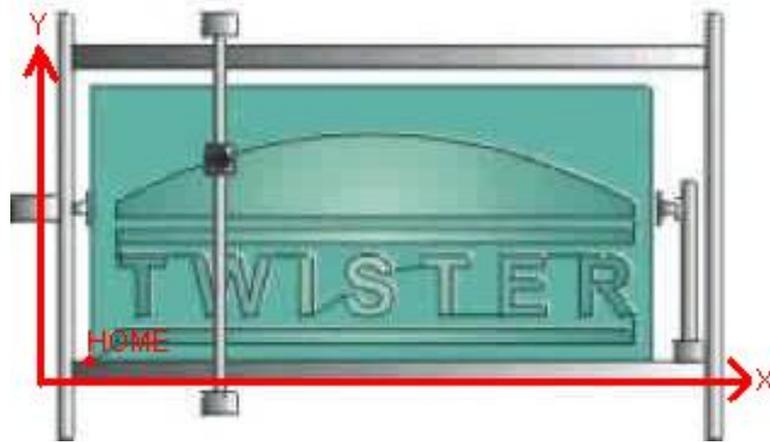
**Figura 3.1** Contorno de esquineros a cortar en una máquina CNC.

Una vez elaborada la figura en formato digital, se guarda en un archivo y se procede a utilizar el software CAM, que viene siendo un programa elaborado por la empresa que fabricó la máquina CNC para el control de la misma. En el programa se incluye un submenú de configuración donde se establecen parámetros importantes: modo (2D/3D), velocidad de corte y potencia de calentamiento.

Tras el ajuste de los parámetros, se puede utilizar la máquina en modo manual, dependiendo del diseño de la máquina podría ser necesario entrar a éste modo porque aquí se incluye el comando para ajustar los ejes en la posición de

HOME (una de las esquinas del plano XY). También es necesario que antes de que la máquina comience a cortar, el operador debe posicionar el bloque de EPS de manera que una de sus aristas quede lo más cerca posible del hilo de corte situado en HOME (la máquina no debe estar en movimiento).

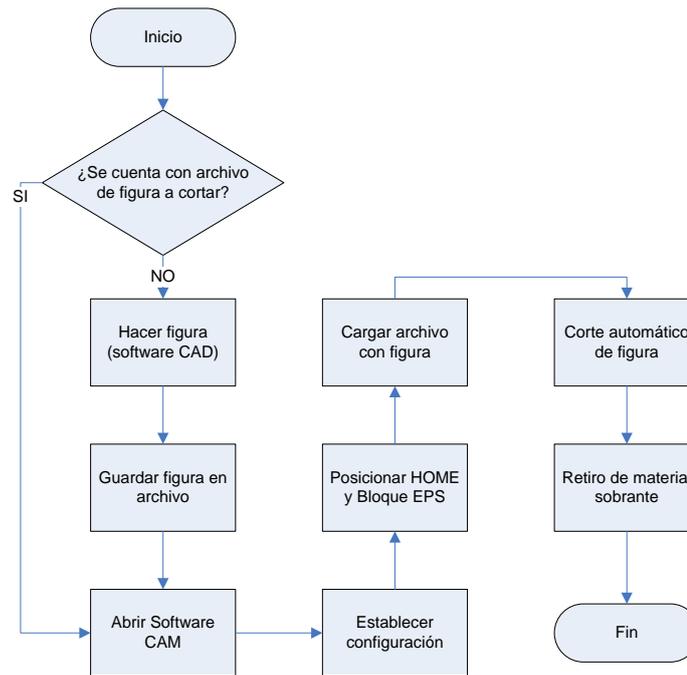
La siguiente figura ilustra la posición del bloque dentro de la máquina.



**Figura 3.2** Vista frontal de la máquina CNC [1].

Tras la ejecución de los pasos anteriores se abre el archivo con la figura a generar y se da la orden de iniciar el corte, es decir, realizar el movimiento coordinado de los ejes con base en la figura precargada. Una vez terminado se retira el material sobrante y finalmente se obtiene la figura deseada hecha con EPS. El archivo con la figura no se desecha, y suele ser reutilizado para generar la figura varias veces.

El siguiente diagrama de flujo resume el proceso.

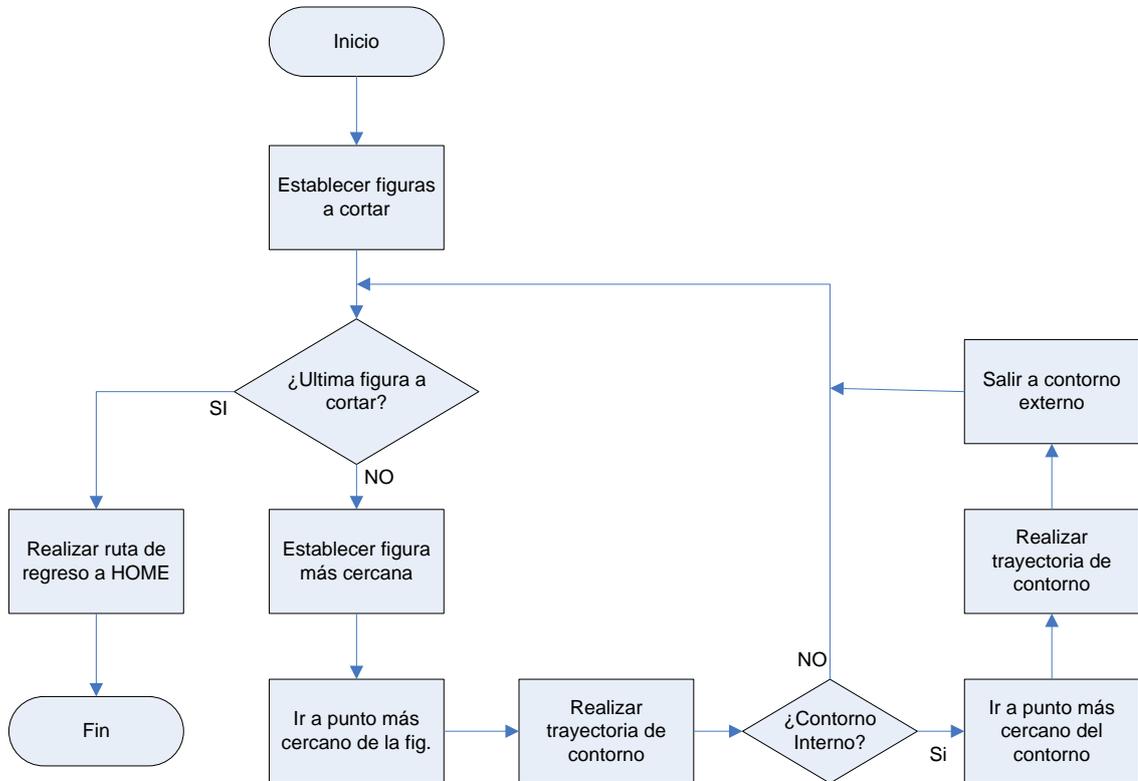


**Figura 3.3** Diagrama de flujo del proceso.

Es importante mencionar que cuando se busca formar varias figuras dentro de un solo bloque de EPS el algoritmo de la máquina genera una ruta que será la trayectoria a seguir por el hilo de corte, de manera que se formen todas las figuras usando el menor desplazamiento posible y evitando, en la medida de lo posible, no cortar por en medio de una figura ni tampoco pasar por un contorno en más de una ocasión.

En la figura 3.2 lo anterior se representa así: primero el hilo se desplaza desde la posición de HOME hasta el punto más cercano de la figura más cercana (el rectángulo debajo de la palabra “TWISTER”), el hilo realiza la trayectoria del contorno de dicho rectángulo, luego buscará la siguiente figura más cercana que en la figura corresponde a la letra “R”, y así sucesivamente. En la letra R nótese que ésta tiene contorno interno (la figura en forma de bala, encerrada dentro de las líneas gruesas que le dan forma a la letra R) y en éste caso será necesario desplazarse por en medio del área de la figura. Cuando se terminen de formar todas las figuras, el hilo no buscará la posición de HOME en forma directa, sino que rodeará el bloque de EPS con el fin de no pasar por en medio del área de las figuras hechas.

El siguiente diagrama de flujo resume el algoritmo a seguir por la máquina para realizar los cortes:



**Figura 3.4** Diagrama de flujo del algoritmo de corte.

## 3.2 Antecedentes bibliográficos

### 3.2.1 El Poliestireno Expandido

El poliestireno expandido o “estereofón”, como se conoce comúnmente en Costa Rica es un polímero que se ha empleado para diversas aplicaciones, sus usos van desde embalajes (recipientes o envolturas para transporte y almacenamiento) hasta en el sector construcción, en forma de paneles, esquineros, columnas, aislantes, perfiles, inclusive para rotulación [2]. La siguiente figura muestra ejemplos de figuras hechas con EPS.



**Figura 3.5** Figuras hechas de poliestireno expandido [1].

En éste último campo el EPS es un material muy utilizado debido a sus propiedades de aislante térmico, aislante acústico, bajo costo, baja densidad, baja descomposición y no constituye un sustrato nutritivo para organismos (como termitas y moho). Suele ser recubierto con concreto y una malla de metal, lo que le brinda mayor dureza, y esto lo convierte en un buen sustituto de la madera.

A continuación se muestra una tabla que resume los valores de algunas propiedades físicas del EPS [2-6]. Conocer estas propiedades es importante porque están relacionadas con la capacidad térmica del EPS, factor que influye en los procesos de corte.

**Tabla 3.1** Resumen de propiedades físicas del EPS.

Densidad (1)	~19-200kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de Fusión	240°C
Temperatura de Ignición (2)	402°C
Conductividad térmica (1,3)	0.08W/(m.K)
Calor específico (3)	1.3kJ/(kg.K)
Coefficiente de Convección	1.0 W/(m <sup>2</sup> .°C)

(1): Depende del fabricante o proceso de fabricación.

(2): Temperatura a la cual los compuestos del EPS se inflaman.

(3): A temperatura ambiente.

Algunos parámetros del EPS pueden variar según el fabricante o proceso de fabricación del bloque, como lo es la densidad y la conductividad térmica, para ilustrar esto, en la tabla 3.2 se comparan dichos parámetros según las hojas de datos de dos fabricantes [3, 4]. También, algunos parámetros son dependientes

de la temperatura, como es el caso de la conductividad térmica y el calor específico [6].

**Tabla 3.2** Comparación de propiedades físicas del EPS según marca.

Propiedad Física	Styrofoam SM	KNAUF Therm Th35SE
Densidad mínima (kg/m <sup>3</sup> )	30	19
Conductividad térmica mínima (mW/m.K)	28.8	35

### 3.2.2 Los hilos de Nicromo

El Nicromo es una aleación de Níquel y Cromo, puede ser una aleación compuesta únicamente por estos dos metales aunque también suele agregarse metales en menor cantidad, como el Hierro o el Manganeso. Debido a sus propiedades físicas como resistividad eléctrica, resistencia a la oxidación en altas temperaturas, y alta temperatura de fusión [7] lo convierten en un material muy utilizado para aplicaciones como resistencias de calentamiento en hornos o secadoras. Se vende comercialmente en forma de hilos de diversos diámetros.

Tres propiedades importantes a conocer cuando se diseña empleando un alambre de Nicromo son: el coeficiente de expansión térmica lineal, la resistencia eléctrica y la tabla de temperatura del hilo en función de la corriente eléctrica que pasa por él.

El coeficiente de expansión térmica lineal se refiere al grado de variación en la longitud del hilo cuando éste cambia su temperatura, por lo general los cuerpos sólidos tienden a expandirse con el calor y a encogerse con el frío. Cuando el hilo (alambre cilíndrico) de Nicromo es calentado hasta alcanzar la temperatura de corte, la expansión térmica hará que el hilo mida más que cuando fuese medido a temperatura ambiente, entonces, el hilo debe ser tensado con la fuerza necesaria para evitar que éste se curve una vez alcanzada la temperatura de corte. Para el Nicromo A (80%Ni, 20%Cr) el coeficiente de expansión térmica lineal es de  $13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [8].

La resistencia eléctrica es un parámetro que viene incluido dentro de una hoja de datos para hilos de Nicromo y se expresa en unidades de resistencia eléctrica (latente en el material) por unidad de longitud. Por tanto, es importante definir el largo del hilo para poder determinar la resistencia eléctrica total. Tomar

en cuenta que éste dato varía según el espesor del hilo y la temperatura, el valor de resistencia suele darse cuando el hilo está a temperatura ambiente, conforme la temperatura aumenta también aumentará la resistencia eléctrica.

La tabla 3.3 muestra los valores de resistencia eléctrica por unidad de longitud a temperatura ambiente, para hilos de Nicromo A y Nicromo C de diversos calibres [9].

**Tabla 3.3** Resistencia eléctrica de hilos de Nicromo a 20°C.

Calibre AWG	Diámetro (mm)	Resistencia (Ohm/cm)	
		NiCr A	NiCr C
10	2,591	0,0020	0,0021
11	2,311	0,0026	0,0027
12	2,057	0,0033	0,0034
13	1,829	0,0041	0,0043
14	1,626	0,0052	0,0054
15	1,448	0,0066	0,0068
16	1,295	0,0082	0,0085
17	1,143	0,0105	0,0109
18	1,016	0,0133	0,0138
19	0,914	0,0165	0,0171
20	0,813	0,0208	0,0216
21	0,7239	0,026	0,027
22	0,6426	0,033	0,035
23	0,5740	0,042	0,043
24	0,5105	0,053	0,055
25	0,4547	0,067	0,069
26	0,4039	0,084	0,088
27	0,3607	0,106	0,110
28	0,3200	0,134	0,140
29	0,2870	0,167	0,173
30	0,2540	0,213	0,221
31	0,2261	0,269	0,280
32	0,2032	0,333	0,346
33	0,1803	0,423	0,439
34	0,1600	0,537	0,558
35	0,1422	0,680	0,706
36	0,1270	0,853	0,886
37	0,1143	1,053	1,094
38	0,1016	1,333	1,384
39	0,0889	1,741	1,808
40	0,0787	2,219	2,304

La tabla de “temperatura versus corriente” es un dato que ofrece el fabricante y que tiene aplicación en el diseño. Permite determinar cuanta corriente eléctrica es requerida para calentar el alambre a cierta temperatura. A continuación, un ejemplo de éste tipo de tablas [10].

**Tabla 3.4** Corriente vs temperatura para el Nicromo 60(C)<sup>2</sup>.

AWG	Diametro (mm)	Temperatura (°C)								
		204	316	427	538	649	760	871	982	1093
16	1.2954	6.13	8.31	10.50	13.11	16.30	20.10	24.10	28.20	32.30
17	1.143	5.31	7.18	9.13	11.30	13.90	16.90	20.30	23.60	27.00
18	1.016	4.66	6.26	7.90	9.75	11.96	14.51	17.37	20.48	23.08
19	0.9144	4.09	5.46	6.84	8.41	10.30	12.45	14.87	17.78	19.73
20	0.8128	3.58	4.77	5.92	7.25	8.86	10.69	12.72	15.43	16.87
21	0.7239	3.14	4.16	5.13	6.26	7.63	9.17	10.88	13.40	14.40
22	0.64262	2.76	3.63	4.44	5.40	6.56	7.87	9.31	11.63	12.33
24	0.508	2.12	2.76	3.32	4.01	4.86	5.80	6.82	8.76	9.01
25	0.45466	1.84	2.42	2.90	3.44	4.15	4.97	5.86	6.96	7.72

### 3.2.3 Modelo matemático para la distribución de calor.

La ecuación de calor, que también es conocida como la ecuación parabólica de derivadas parciales [11] permite determinar la distribución de temperatura en una región o cuerpo para un instante de tiempo dado, por lo que se compone de tres variables espaciales (coordenadas X, Y, Z) y una variable temporal “t”. La forma general de ésta ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

Donde k es una constante que representa la conductividad térmica del cuerpo o material en estudio.

Tras la investigación realizada en [6], se utiliza la ecuación en (3.1) para describir la distribución de temperatura en el caso particular de una lámina de poliestireno expandido y que es influida por el efecto de una fuente de calor (hilo de corte) en movimiento con dirección en favor el eje Y positivo. El modelo propuesto permite determinar -bajo condiciones de velocidad y potencia calorífica

<sup>2</sup> Corriente es expresada en Amperios.

del hilo de corte- la distribución de temperatura en el EPS, e incluso el espacio de corte. La ecuación de calor para el caso específico se muestra a continuación:

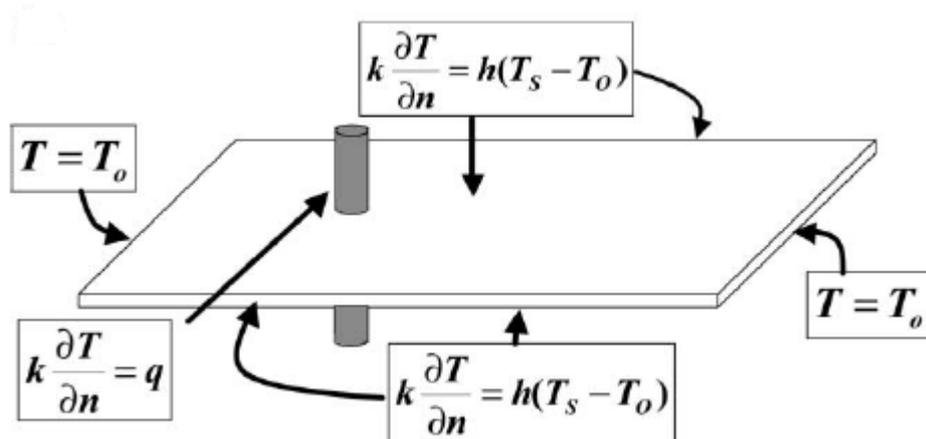
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left( k \frac{\partial T}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t_M} - V_{ir} \times \frac{\partial T}{\partial y_M} \right\} \quad (3.2)$$

Donde:

$$y_M = y - V_{ir} \times t \quad (3.3)$$

Es decir, la variable coordenada en el eje Y es dependiente del tiempo por el efecto de la velocidad con que se desplaza el hilo de corte. Y además “ρ” y “c” representan, respectivamente, la densidad y el calor específico para el poliestireno expandido.

Como la resolución de la ecuación de calor es complicada para casos particulares donde se establecen las dimensiones del material de estudio, en [6] se utilizó un análisis de elementos finitos para aproximar el resultado, definiendo condiciones de frontera en ubicaciones clave como lo son los bordes del bloque de EPS, y reduciendo el problema a un caso bidimensional, dado que para el eje paralelo a lo largo del hilo de corte existe simetría en la distribución de temperatura. La figura 3.6 muestra las condiciones de frontera definidas para el caso propuesto.



**Figura 3.6** Condiciones de frontera para la resolución de la ecuación de calor.

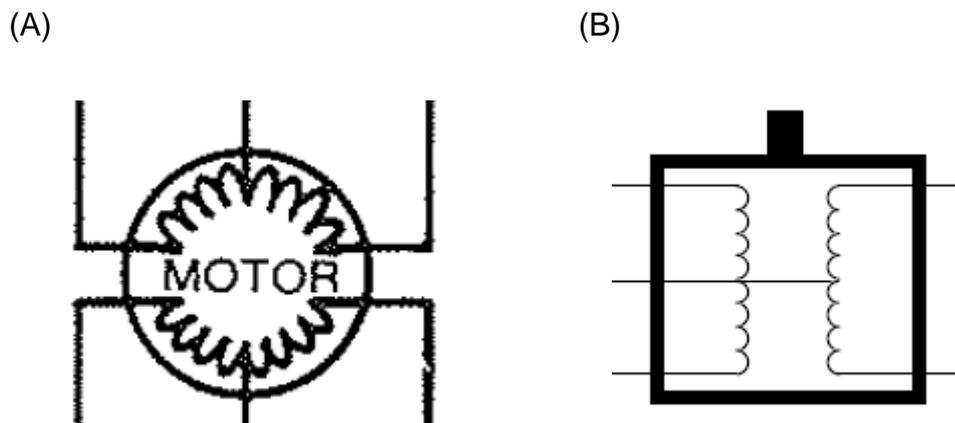
Cabe destacar que el hilo de corte se modela como una fuente cilíndrica de calor, donde el diámetro del hilo no es influyente en el cálculo, sino más bien la potencia generada por dicho hilo es el factor a considerar.

### 3.2.4 Control de motores paso-a-paso unipolares

Los motores paso-a-paso se distinguen de otros motores por no contar con “escobillas” en su diseño, poseer la capacidad de mantener una cierta cantidad de Torque en estado estático, su velocidad es independiente de la carga, posee baja inercia y su movimiento en pasos o “STEPS” lo hacen predecible, por lo que no requiere de realimentación para ser controlado [12].

Existen dos tipos de motores paso-a-paso, Bipolares y Unipolares. El estudio se va enfocar en el uso de motores paso-a-paso unipolares puesto que son los utilizados en el prototipo.

Los motores paso-a-paso unipolares se caracterizan por tener 4 fases, o bien, 2 fases con una derivación central en sus bornes. Los primeros poseen 8 conectores mientras que los segundos poseen 6 o 5 conectores, se presenta a continuación una ilustración de éste último caso [13, 14].



**Figura 3.7** Motores paso-a-paso (A) de 6 hilos y (B) de 5 hilos.

Para generar el movimiento en el rotor, se debe generar una secuencia donde se energiza una o dos fases siguiendo una secuencia; la alimentación de la(s) fase(s) en forma apropiada y en el instante de tiempo apropiado permiten generar un movimiento continuo. De igual forma, para mantener el motor frenado

en posición estática se deja energizada una o dos fases, esto hará que el rotor quede atraído magnéticamente con la o las fases energizadas.

Existen 3 tipos de secuencia: “full step” de 1 fase, “full step” de 2 fases y “half step”; los dos últimos son los más utilizados, el “full step” de 2 fases genera mayor torque en el rotor, mientras que el “half step” aumenta la resolución y esto permite dar “steps” con ángulo de giro menor que si fuesen dados con “full step”. La siguiente tabla ilustra la secuencia a seguir para generar el movimiento de un motor unipolar, en “full step” de 2 fases.

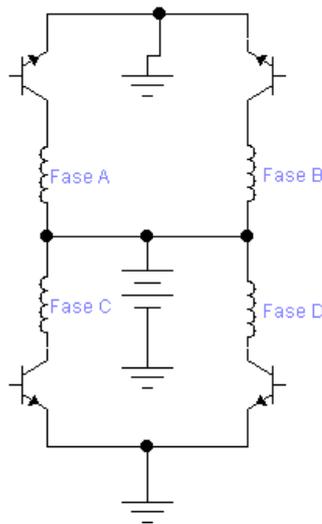
**Tabla 3.5** Secuencia de activación de fases en “full step”<sup>3</sup>.

<b>Secuencia</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
Fase A	1			1	1
Fase B		1	1		
Fase C	1	1			1
Fase D			1	1	

Algunos drivers utilizados para el control de motores paso-a-paso ya generan ésta secuencia [13], sólo dependen de las señales CLOCK y DIRECTION para determinar la velocidad y el orden con que realizan dicha secuencia. Otro tipo de drivers no cuentan con ésta capacidad y requieren de un dispositivo lógico externo que genere la secuencia [14].

Para que el driver tenga control sobre las fases energizadas, la derivación central de los devanados es conectada a la fuente de alimentación, mientras que cada extremo es conectado un elemento de interrupción (generalmente transistores) que cuando se cierra pone el extremo del devanado a tierra y pone la fase en conducción. Para ilustrar esto de muestra la siguiente figura.

<sup>3</sup> Se representa con un “1” las fases que están en conducción.



**Figura 3.8** Control de fases de un motor paso-a-paso unipolar.

Los motores paso-a-paso cuentan con características nominales de operación, externamente en su placa vienen datos como: corriente nominal por fase, tensión nominal por fase, resistencia nominal por fase o ángulo de giro por STEP (en grados). Saber éstos datos es muy importante porque suele ser común que los drivers ofrezcan mayor tensión eléctrica de la que puede soportar el motor, entonces ¿Cómo se hace en estos casos?

La solución es regulando la corriente de alimentación de los devanados [12], para esto hay dos formas:

- A. Poniendo una resistencia limitadora de corriente, en serie con el devanado.
- B. Utilizando control por medio de modulación de ancho de pulso, en éste caso se utiliza un voltaje de referencia y realimentación por medio de una resistencia de sensado.

Las dos formas fueron utilizadas en la implementación del prototipo, pero eso se verá con más detalle en la sección 3.3.2

### 3.2.5 El formato de archivo HPGL

El lenguaje gráfico empleado en los archivos HPGL (Hewlett Packard Graphics Language), cuya extensión es “.plt”, fue originalmente implementado

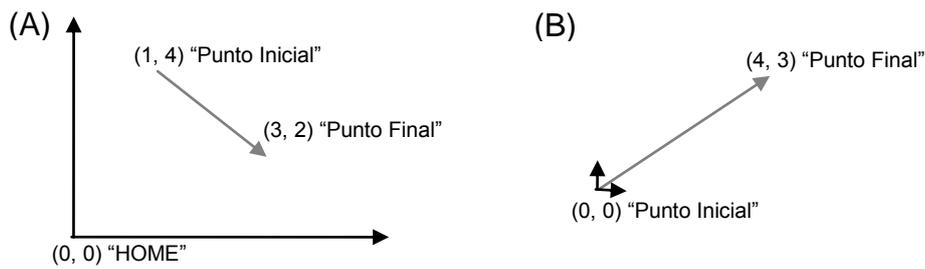
para el control de la impresora HP 7475A de la empresa Hewlett-Packard [15], pero en la actualidad sigue siendo empleado por varios programas de diseño para la representación de figuras y planos.

Los comandos que componen dicho lenguaje consisten de dos letras que representan la instrucción, según el caso es seguido por un número que sirve de parámetro, un espacio o coma, otro número (parámetro) y un punto y coma que indica el fin del comando. Los números que conforman los parámetros pueden ser tanto números reales como números enteros. La siguiente tabla resume los comandos más importantes.

**Tabla 3.6** Descripción de algunos comandos HPGL.

<b>Instrucción</b>	<b>Descripción</b>
“Initialize Set Instruction” IN[:]	Ajusta parámetros (modo gráfico) o condiciones por defecto, suele ir siempre al inicio del código.
“Select Pen” SP [n] [:]	Selecciona el tipo de “lápiz” (pen) a utilizar especificándose en “n”, que debe ser un número entero entre 0 y 6, al final del código la última instrucción suele ser “SP0;”.
“Plot Absolute” PA [X, Y] [:]	Esta instrucción indica que los valores coordenados de “X” y “Y” son absolutos, para ésta o las instrucciones siguientes, en unidades gráficas. Además realiza el movimiento de los ejes coordenados desde la posición actual hasta el punto especificado en “X” y “Y”.
“Plot Relative” PR [X, Y] [:]	Similar a “Plot Absolute” pero con la indicación de que los valores “X” y “Y” son relativos.
“Pen Up” PU [X, Y] [:]	Similar a “Plot Absolute” pero con la indicación de que levante el lápiz de dibujo, esto quiere decir que existe desplazamiento del eje coordenado pero no hay traza de línea.
“Pen Down” PD [X, Y] [:]	Similar a “Plot Absolute” pero con la indicación de que baje el lápiz de dibujo, esto quiere decir que no sólo existe desplazamiento del eje coordenado, sino además hay traza de línea.

Cuando en el formato HPGL se habla de valores absolutos quiere decir que el eje coordenado debe tomarse a partir del punto “HOME” como el punto (0, 0), cuando se habla de valores relativos quiere decir que el eje coordenado debe tomarse a partir de la posición actual como el punto (0, 0). La siguiente figura ilustra desplazamientos relativos y absolutos.



**Figura 3.9** Desplazamiento. (A) Absoluto; (B) Relativo.

### 3.2.6 Librerías JAVA

Es importante resaltar que para el desarrollo del programa de software, tanto en la parte CAM como en la parte CAD, se emplearon algunos de los métodos o clases que vienen incluidas en las librerías de JAVA, se mencionan.

- A. La clase JFileChooser: ésta clase permite invocar a un método que abre de forma automática en la GUI una ventana prediseñada, en la cual el usuario puede hacer selección de un archivo en particular. Su aplicación es a la hora de seleccionar el archivo a trabajar. También posee el método “getPath()” con el cual se almacena la dirección o ruta del archivo especificado [16].
- B. Las clases FileReader y BufferedReader: una vez especificado nuestro archivo con JFileChooser, las clases FileReader y BufferedReader sirven para realizar lecturas propias del archivo. Se destaca el método “readLine()” que permite la lectura de una línea de código en el archivo [17].
- C. La clase String: ésta corresponde a una clase especial para el manejo de una cadena de caracteres. Se destacan los métodos: “startsWith([string])” que hace una comparación lógica del inicio de la cadena con la cadena especificada como entrada del método, “indexOf([string])” se especifica un caracter de entrada y el método devuelve la primer posición encontrada del caracter especificado, “substring([int inicio, int final])” extrae un string a partir de otro string, y finalmente “parseInt([string])” que convierte una cadena de números en una variable tipo integer [18].

- D. La clase Graphics: clase básica de JAVA para la generación de gráficos. Incluye los métodos “drawLine([int xini, int yini, int xfin, int yfin])” que genera una línea en pantalla a partir del punto inicial y el punto final, con base en el eje coordenado gráfico [19].

### **3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.**

El tipo y grosor del alambre utilizado como hilo de corte se determina en función de las especificaciones de temperatura, precisión y velocidad de corte requeridas, dado que la mayor o menor medida de cada parámetro afecta significativamente otras propiedades, con sus ventajas y desventajas, se explica:

- A. La temperatura de corte implica mayor resistencia eléctrica (menor uso de corriente eléctrica para alcanzar la temperatura deseada), pero menor resistencia mecánica y mayor elongación del hilo por dilatación térmica, un factor no deseado porque el hilo debe mantenerse lo más tenso posible; también, al sublimar más producto implica mayor facilidad de corte pero también mayor grosor, lo que le quita precisión al corte.
- B. Aparte de la temperatura, el diámetro del hilo es un factor que afecta la precisión; entre más diámetro, más grueso es el volumen de corte pero mayor resistencia mecánica del hilo.
- C. La resistencia mecánica influye subsecuentemente en la velocidad de corte, con un alambre muy fino se tienen que aplicar velocidades muy bajas de corte, a fin de evitar que el mismo se rompa.

Por tanto, el diámetro del alambre a emplear depende de un equilibrio existente entre los parámetros de corte. En la práctica el operario varía los parámetros en forma empírica hasta encontrar los valores que mejor se ajustan a su necesidad.

El modelo descrito en la sección 3.2.3 puede servir para determinar condiciones óptimas de corte, sin embargo, el aplicar éste modelo tiene ciertos inconvenientes:

- A. La ecuación depende de variables del EPS que a su vez dependen de la temperatura, tal es el caso del calor específico y la conductividad térmica, esto agrega complejidad al cálculo.
- B. Se considera el caso de una fuente de calor desplazándose en un eje espacial, dicho caso implica que sólo pueda ser analizado en programas especializados para la resolución de problemas complejos en relación con las ecuaciones de derivadas parciales.

Entonces, el modelo matemático propuesto no tiene uso práctico, dado que se requieren de software complejo y conocimientos de matemáticas a nivel de Ingeniería para su resolución, mientras que las empresas requieren de métodos más sencillos para determinar parámetros de corte.

Sin embargo, del modelo propuesto se concluye que los parámetros válidos de temperatura y velocidad de corte dependen de las características de densidad, calor específico y conductividad térmica del material, por lo que los parámetros no pueden ser establecidos a un rango fijo y están sujetos a las características del bloque de EPS.

Como no se puede aplicar una fórmula para realizar una estimación de los parámetros adecuados, se propone utilizar métodos experimentales donde se varíe los parámetros de corte, de manera que se pueda obtener una gráfica de velocidades de corte máxima y mínima, en función de la potencia (o temperatura) de corte. El valor máximo de la velocidad es tal que el hilo de corte nunca vaya a tocar el bloque de EPS, y la velocidad mínima es tal que el corte no supere el valor límite del espacio de corte. Dicha tabla servirá como referencia para que el operario realice los ajustes en función de su necesidad.

### **3.3.1 Teoría básica del hilo de corte**

A la hora de diseñar un sistema de hilo de corte, es decir, el control de un alambre calentado por corriente eléctrica, es necesario tener definidos ciertos parámetros. Por lo general, dos parámetros que le interesan al diseñador son la temperatura de corte y el largo del alambre de corte; a partir de dichos

parámetros, más algunos datos técnicos que nos ofrece el fabricante del alambre, se pueden definir el resto de los elementos necesarios.

Cuando se define el largo del hilo de corte, la resistencia eléctrica del alambre a temperatura ambiente se determina:

$$R = r \cdot L \quad (3.4)$$

Donde “r” es la resistencia eléctrica del hilo por unidad de longitud, y “L” es la longitud del hilo. Luego con la tabla “temperatura vs corriente” (descrita en la sección 3.2.2) se determina la intensidad de corriente necesaria para calentar el hilo a la temperatura requerida. Conociendo la resistencia y la corriente eléctrica, por Ley de Ohm se determina el valor de tensión eléctrica requerida:

$$V = I \cdot R \quad (3.5)$$

La tensión eléctrica determinada es la que se debe aplicar al hilo entre sus bornes para calentarlo. Sin embargo, en la práctica la fuente de tensión eléctrica no posee un valor constante, sino que existe una etapa de control de potencia entre la fuente y el hilo, con el fin de variar la potencia y así graduar la temperatura de corte.

Otro factor a mencionar es que cuando el hilo de corte alcance la temperatura requerida, la resistencia eléctrica del hilo tiende a ser mayor que cuando el hilo estaba a temperatura ambiente. Esto no es un factor crucial si el hilo de corte no posee elementos resistivos conectados en serie, esto por cuanto un aumento en la resistencia eléctrica sólo implicaría una disminución en la intensidad de corriente eléctrica, y no representa (consecuentemente) una disminución en la temperatura.

### **3.3.2 Teoría básica de los motores paso-a-paso**

Como se había mencionado en la sección 3.2.4, existen dos formas para limitar la corriente que el driver suministra al motor, la limitación de corriente es importante para adecuar las condiciones de operación al nivel con que el motor fue diseñado y así prolongar su vida útil. En el prototipo se utilizaron dos tipos

diferentes de drivers, uno que no posee control directo de corriente y otro que incluye control de corriente por medio de PWM, por lo que se tuvieron que utilizar técnicas de diseño específicas para cada caso.

Para el caso del driver que no posee control directo de corriente, se tiene que poner una resistencia limitadora, el cálculo de dicha resistencia se obtiene por medio de la siguiente ecuación [13]:

$$R_{Serie} = \frac{V_{PL} - V_{Drop}}{I_m} - R_m \quad (3.6)$$

Donde:

- $V_{PL}$  es la tensión eléctrica de la fuente de alimentación.
- $V_{Drop}$  es la caída de tensión eléctrica por efecto de los transistores de control (normalmente se establece como 1 Voltio).
- $I_m$  es el valor nominal de corriente eléctrica por cada fase del motor.
- $R_m$  es la resistencia eléctrica en una de las fases del motor.

También es necesario determinar la potencia que puede soportar dicha resistencia, para eso se aplica la siguiente fórmula.

$$P_{Rserie} = I_m^2 \cdot R_{Serie} \cdot 1.75 \quad (3.7)$$

La constante de 1.75 es un criterio de seguridad que proporciona el fabricante del driver utilizado; como las resistencias deben disipar una cantidad considerable de potencia éstas tienden al sobrecalentamiento. Con el fin de evitar el desgaste que pueda generar dicho sobrecalentamiento se utilizan resistencias cuya capacidad de disipación esté por encima del valor de operación.

En el caso del driver con control por medio de PWM, parte de la circuitería requerida para generar la modulación ya la integra el mismo driver, nada más necesita incorporar algunos elementos por parte del diseñador. La hoja de datos

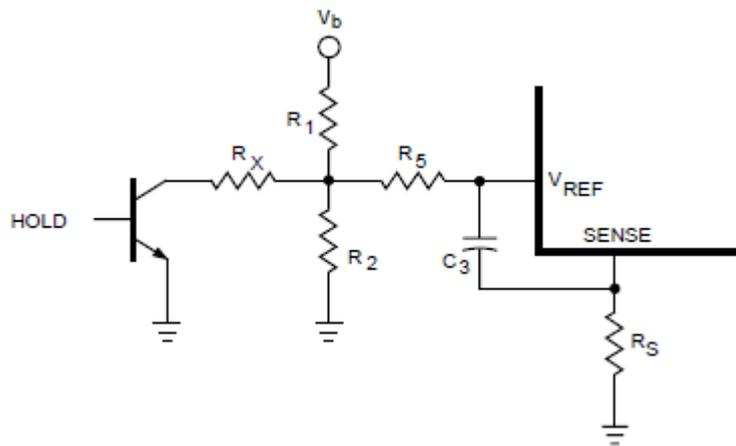
del fabricante [14] establece que para limitar la corriente de alimentación de cada fase, se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{OUT} \approx \frac{V_{REF}}{R_S} \quad (3.8)$$

Donde:

- $V_{REF}$  es el voltaje de referencia que establece el diseñador (máximo 2 Voltios).
- $R_S$  es la resistencia utilizada para el sensado de la corriente que pasa por el devanado.

Para la resistencia de sensado se utilizan valores del orden de 1 Ohmio, mientras que para el voltaje de referencia se utiliza por lo general un divisor de tensión; el siguiente diagrama es la conexión sugerida por el fabricante.



**Figura 3.10** Conexión sugerida por el fabricante para el SLA7026M.

Para establecer entonces la corriente de alimentación del motor, se aplica la siguiente fórmula.

$$I_{OUT} \approx \frac{R_2 R_X}{R_1 R_2 + R_1 R_X + R_2 R_X} \frac{V_B}{R_S} \quad (3.8)$$

Cuando el motor está en movimiento, la resistencia  $R_x$  no toma participación en la división de tensión, por lo que el propósito de calcular  $R_1$  y  $R_2$  es establecer la corriente de operación del motor cuando está en movimiento. Cuando el motor está detenido, la señal HOLD habilita la conducción de  $R_x$  e influye, consecuentemente, en el voltaje de referencia; se debe escoger  $R_x$  de manera tal que en reposo la corriente que alimenta las fases sea menor que la corriente suministrada en movimiento, pero que también mantenga al motor con el Torque suficiente para mantener al motor frenado, sin que esto represente una disipación innecesaria de potencia en el devanado del motor.

## **Capítulo 4: Procedimiento metodológico**

### **4.1 Reconocimiento y definición del problema**

Para poder identificar la existencia de un problema, primero se tuvo una entrevista con el gerente de operaciones de la empresa Digicontrol S.A. el cual dio una descripción general del proceso y su problema. Luego se realizaron visitas a empresas que se dedican a la fabricación de figuras con EPS: Onix Costa Rica e IPAK FGP S.A. quienes son interesadas directas. Aquí se recopiló información sobre el proceso, las características del sistema actual y las posibles restricciones de diseño.

Una visita adicional fue realizada a la empresa Panacor S.A. la cual no está interesada con el proyecto, pero que sirvió para recabar información. Finalmente se investigó acerca de empresas fabricantes de máquinas CNC a través de sitios web, y también sobre conceptos clave que tienen relación directa o indirecta con el proceso (características de EPS, hilos de corte, formatos de archivo tipo CAD, etc.).

Con base en la información recabada, y tras un análisis, se hizo una síntesis del problema:

“La oferta de máquinas de corte en EPS tipo CNC existentes en el mercado poseen inconvenientes de servicio y diseño que difieren de los requerimientos de las empresas costarricenses ligadas a la producción de figuras con éste material”.

Una vez identificado el problema, y con base en la investigación realizada se propuso como solución diseñar una nueva máquina CNC, pero orientada a responder las necesidades de las empresas del área. Como diseño se manejaron varias posibilidades dependiendo de la sección de la máquina (control de hilo de corte, protocolo de comunicación, software, accesorios), Al final se seleccionó la solución que comprende mejor las restricciones de diseño propuestas por las empresas interesadas (descritas en la sección 1.2)

## **4.2 Obtención y análisis de la información**

### **4.2.1 Visita a empresas**

En la visita a la empresa Onix, se explicó un poco sobre el proceso de fabricación de las figuras hechas con EPS: poseen cámaras de moldeo para formar los bloques, luego los bloques se almacenan y se preparan para darles la forma de esquineros que después son recubiertos con una malla alambrada mezclada con cemento para darle mayor dureza, y así los esquineros son empleados en el sector construcción para darle un acabado especial a los marcos de las ventanas.

Dicha empresa posee una máquina cortadora de EPS, pero de control manual, no automatizado. Fue aquí donde se explicó que la empresa muestra interés en conseguir una máquina tipo CNC para agilizar la producción, pero que se requiere una máquina de dimensiones particulares, hecha a la medida, y sólo en Europa se consiguen máquinas personalizadas a pedido y con implicaciones de costo, tanto de tiempo como de recursos.

En otra visita, la empresa IPAK se dedica no sólo a la fabricación de esquineros para el sector construcción sino además en la fabricación de rótulos tridimensionales y envases para comida. Posee una máquina cortadora de EPS tipo CNC, pero que lleva mucho tiempo sin utilizar debido a un daño que presenta el control de los motores. La empresa fabricante (de origen estadounidense) no brinda servicio de mantenimiento en nuestro país.

La computadora utilizada para el control de la máquina es una Apple Macintosh, de tecnología obsoleta, y con comunicación por puerto serie con dispositivo de control. Particularidades de ésta máquina es que utilizaba un scanner donde se digitalizaban las figuras a crear y adicionalmente contaba con un Joystick para el control manual de la máquina, tales características no se consideraron al plantear la solución porque complicaban el diseño.

(A)



(B)



**Figura 4.1** Visita a la empresa IPAK FGP S.A. (A) Esquineros hechos con EPS. (B) Máquina CNC con avería.

Se visitó adicionalmente a la empresa PanaCor, porque dicha empresa posee máquinas CNC de dos marcas: Hotwire Direct y Megaplot. Esta visita sirvió para ver ejemplos de máquinas CNC en funcionamiento, y así tener una idea más clara de cómo debe de operar éstos equipos.

De la información obtenida en las tres empresas se coincidió en la incongruencia existente en los programas para el diseño de las figuras que presentan mucha complejidad mientras que los diseños a crear son relativamente sencillos. También, la poca flexibilidad para sustituir las computadoras dedicadas exclusivamente para el manejo del sistema, dado que los modelos actuales de máquinas CNC no han emigrado hacia tecnologías más recientes.

#### **4.2.2 Estudio de máquinas CNC existentes y temas relacionados**

Otra actividad fue la investigación realizada sobre las empresas fabricantes y las características de las máquinas CNC disponibles en el mercado, a fin de determinar tanto el vacío existente entre la oferta y la demanda como también las características generales de una máquina de corte CNC. Algunos fabricantes estudiados fueron HotwireDirect, MegaPlot, Tekoa, Foamlinx, Demand, y HobbyCNC.

En el estudio se pudo constatar las partes que componen una máquina CNC y que se describieron con más detalle en las secciones (1.1) y (3.1). Otro

factor que influyó en la escogencia de la solución fueron elementos clave como los costos del material a utilizar como hilo de corte para la realización de pruebas, el costo y grado de importancia de incluir accesorios como mesa giratoria o capacidad de diseño 3D, comparación de protocolos de comunicación, las características del software a implementar, complejidad del formato de archivo y la comparación de costos-desempeño para el control del hilo de corte.

### **4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

La búsqueda de alternativas de solución se divide por secciones que corresponden a las distintas partes de la máquina, no se puede pensar en dos o más soluciones completamente diferentes porque se pueden encontrar concordancia en alguno que otro aspecto de la implementación. A continuación se explica cada sección:

- A. Software CAM: Un punto importante a definir era el formato de archivo con el que se trabajaría, porque parte del diseño del software CAM implica que esté en posibilidad de leer e interpretar la información contenida en el archivo para traducirlo a movimientos de la máquina, ¿se debe diseñar un nuevo formato o se debe utilizar un formato comercialmente conocido? ¿debe rediseñarse el software CAD o se debe recomendar algún otro existente? Aspectos como facilidad de interpretación, y la capacidad para abrir archivos en otros programas fueron tomados en cuenta.
- B. Medio de comunicación PC-Control: Existen muchos puertos de comunicación estandarizados que se pueden aplicar para la comunicación (USB, serial, paralelo, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, PROFIBUS). ¿El emplear un protocolo de comunicación más reciente se traduce en mayor beneficio para el cliente? Otro factor decisivo fue la inmunidad al ruido.
- C. Control de motores paso-a-paso: Al considerar que los motores paso a paso son los de posicionamiento más preciso, en comparación con otros motores, se optó en definitiva por éste tipo. Se evaluó las prestaciones que deben tener los motores con respecto a la fase de implementación, esto por cuanto no existen restricciones de uso. Los “driver” que controlan los

motores se escogieron de manera que otorguen la corriente necesaria para alimentar al motor.

- D. Control de hilo de corte: Fue importante definir el material a utilizar con base en el costo y accesibilidad. Tanto el estudio de los parámetros que afectan el desempeño del corte como las premisas de diseño (la resistencia eléctrica del hilo de corte y la intensidad de corriente necesaria) determinarían las características del control del hilo de corte. También fueron consideradas algunas medidas de seguridad.

#### **4.4 Implementación de la solución**

Para ir desarrollando cada actividad, primero se realizó una investigación referente al tema, recabando información de utilidad y analizando casos como trabajos anteriores relacionados con el tema, o por ejemplo, aspectos que impliquen un riesgo de seguridad.

Una gran parte de la investigación consistió en buscar exhaustivamente el fundamentar los parámetros de forma teórica, a fin de que éstos sean justificables. Algunos parámetros no son totalmente justificables en forma teórica, por lo que era necesario tener el prototipo de la máquina hecha y realizar pruebas con el fin de validar de forma práctica los parámetros en estudio. El prototipo se diseñó contemplando casos límite y aplicando fundamentos teóricos.

A nivel general, se planteó inicialmente un diseño en papel con los elementos necesarios para el funcionamiento de la máquina, luego tras las pruebas se incorporaron pequeños arreglos al diseño con el fin de arreglar ligeros aspectos que no eran deseados o que producían fallas

Como ejemplo, para el control de la potencia del hilo de corte se planteó inicialmente que la señal ENABLE activara o desactivara la señal de disparo de los SCR en la etapa final del control, sin embargo, tras las pruebas hechas se encontró que el activar el disparo en un instante de tiempo aleatorio provocaba un disparo “en falso” que alteraba la señal que alimenta el primario del

transformador, por lo que se modificó trasladar el ENABLE a la etapa inicial del control para “sincronizar” el ENABLE con la red de alimentación.

Otra modificación fue que, inicialmente el diseño contemplaba sólo 3 ejes (X, Y, Z) pero se modificó a 5 ejes (X1, X2, Y1, Y2, Z) porque los ejes X y Y deben manejar 2 motores y éstos deben tener independencia a la hora de ser enviados a HOME.

Para la evaluación de los programas de prueba, en el software se definieron pequeños objetivos que el programa debe cumplir, cuando la prueba cumple con el micro-objetivo se pasa a otra prueba, incorporando los elementos de las pruebas anteriores y definiendo un nuevo micro-objetivo hasta ir formando el diagrama de flujo propuesto para la solución. Destacar que el desarrollo del software CAD tuvo que ser excluido del proyecto porque se corría el riesgo de no tener el proyecto listo en el plazo establecido.

Todas estas actividades se han venido documentando en un cuaderno/bitácora, de igual manera parte de las investigaciones y documentación de recursos obtenidos se han respaldado en formato digital.

#### **4.5 Reevaluación y rediseño**

Con el trabajo realizado hasta ahora, se pueden sugerir en futuros diseños (derivados de la solución inicial) la posible incorporación y/o modificación de algunos elementos, se destacan:

- A. Desarrollar el software CAD, según las necesidades del cliente.
- B. Inclusión de un sistema de digitalización de figuras mediante scanner o lector óptico para una incorporación más sencilla y dinámica para el usuario.
- C. Desarrollo de la comunicación PC-Control por medio de puerto serial RS-232, Ethernet u otro protocolo de comunicación que permita extender la separación entre la computadora del resto de la máquina a una distancia

mayor a 15 metros (en caso que se requiera). En el capítulo 5 se detalla más a profundidad las razones de ésta sugerencia.

- D. Adaptar el diseño para el desarrollo de figuras tridimensionales, esta sugerencia aplica en función de una demanda considerable por parte del consumidor.

## **Capítulo 5: Descripción detallada de la solución**

### **5.1 Análisis de soluciones y selección final**

Aunque al inicio la primera alternativa de solución planteada fue el desarrollo de una máquina cortadora de poliestireno expandido tipo CNC, la razón por la cual se descartaron otras alternativas de solución fuera del concepto de máquina CNC fue porque se consideró que cualquier otro tipo de solución no se acoplaría bien con las características del proceso descritas en la sección (3.1); dadas las características del problema a resolver, el aporte a la solución del problema no sería significativo o de una implementación mucho más compleja.

Ahora bien, dentro del concepto de máquina CNC existen varias alternativas de solución, pero que se derivan de la combinación de las distintas opciones de implementación para cada sección de la máquina, tal y como se describió en la sección (4.3). Por ésa razón, se va analizar las distintas alternativas de solución según la sección a implementar.

Para el software CAM se describen las posibles alternativas:

- A. Sugerir un programa de diseño CAD ya implementado, disponible en el mercado, que cumpla con los requerimientos planteados, y con base en algún formato de archivo que maneje dicho programa elaborar el algoritmo de interpretación de archivo para la parte CAM.
- B. Además del software CAM, implementar un nuevo programa de software CAD para el diseño de figuras bidimensionales, pero aplicando un formato de archivo conocido a nivel comercial.
- C. Implementar un nuevo formato de archivo diseñado exclusivamente para la descripción de figuras bidimensionales, consecuentemente, implementar el software CAD/CAM para el diseño de figuras en éste nuevo formato.

A fin de poder discernir la mejor alternativa, se estudiaron dos formatos de archivo muy conocidos por su uso en diseño CAD: el "Drawing Exchange Format (DXF)" (extensión .dxf) de la compañía Autodesk, y el "Hewlett-Packard Graphics

Language (HPGL)” (extensión .plt) desarrollado por, precisamente, la empresa Hewlett-Packard.

La gran ventaja de utilizar algunos de éstos formatos es que son formatos de uso libre, es decir, su uso no es limitado por alguna licencia o derecho legal, y dado que son utilizados en la gran mayoría de los programas de diseño CAD su uso no estaría limitado al de un software en particular.

La gran diferencia entre un formato y el otro radica en que el DXF hace referencia a una serie de secciones con “grupos de código” que describen características particulares de determinada información (capas, estilos, líneas definidas, textos, etc.) [20] mientras que el formato HPGL aplica comandos de instrucción con base en un eje coordenado.

Debido a que una posible aplicación del formato de archivo DXF pudiera requerir de un algoritmo complejo para su interpretación, se decidió descartar. Por otro lado, se consideró que el formato de archivo HPGL es el más adecuado por sus características que lo hacen más sencillo de interpretar mediante un algoritmo, al mismo tiempo, se consideró ésta posibilidad por encima de la alternativa numero 3 porque se valoró que es más importante la compatibilidad con otros programas que el desarrollo de un formato exclusivo.

Sin embargo, se tomó la decisión de descartar incluso la alternativa numero 1 porque, si bien puede que exista un programa ya existente que cumpla con los requerimientos del usuario, en la entrega final del producto al cliente se estaría obligando a conseguir el software por aparte, se considera que en la entrega final el usuario debería contar de forma inmediata con la herramienta de diseño, y más adelante el mismo usuario puede elegir si seguir con el software actual o cambiar hacia otra herramienta de diseño.

Otra opción descartada que fue considerada para incluir dentro del diseño es el uso de scanner o lector óptico para digitalizar las figuras, pero que conlleva a un diseño más complejo y aplicación de más recursos.

Durante el desarrollo del proyecto, el software CAD quedó descartado, pero los criterios de diseño expuestos anteriormente se aplican por igual para el desarrollo del software CAM.

La decisión del protocolo de comunicación para la transmisión de datos desde una computadora personal (PC) hacia el módulo de control de la máquina tuvo dos factores que fueron tomados en cuenta, uno de gran peso es la evolución tecnológica porque se busca que la máquina pueda ser conectada a una PC comercial de nueva generación, lo que hace que en un principio se descarten protocolos que ya no se están incorporando en la actualidad como el puerto serie RS-232 y puerto paralelo LPT, o de uso meramente industrial como PROFIBUS y CAN.

Otros protocolos descartados son los de medios inalámbricos, como Wi-Fi y Bluetooth porque el entorno del proceso podría tener fuentes de ruido latentes que provocarían interferencias en la comunicación.

Lo cual deja dos alternativas: USB y Ethernet. Los dos protocolos cumplen bien con los requerimientos mínimos planteados inicialmente, pero finalmente se eligió USB por considerar que la máquina CNC cae dentro de la característica de dispositivo punto-a-punto, que es mejor aprovechado con puerto USB. Cabe resaltar que durante el avance del proyecto, se consideró otro factor que podría convertirse en una desventaja del protocolo USB: el largo máximo de transmisión, el estándar para USB es de 5 metros [21], y en el entorno industrial conviene (en algunas ocasiones) extender por encima de 15 metros, si se requiriera que la máquina CNC y la computadora estuvieran alejadas una distancia mayor no sería posible (sería necesario “hubs” o repetidores que permitan extender la señal). Fue en ese caso que se plantea para futuras versiones el implementar con protocolo Ethernet o incluso reconsiderar el protocolo RS-232.

En esta parte interesa una descripción básica de lo que debe realizar esta sección puesto que no existen restricciones de diseño. Se plantea que éste módulo contenga la unidad de procesamiento que se encargará de recibir las instrucciones provenientes de la PC y con base en ellas emitir las señales de

control que se encargarán de manipular los motores paso-a-paso por medio de los respectivos “driver”, al mismo tiempo que emite la señal que habilita el control del hilo de corte.

Ante las opciones de usar un microprocesador, tarjeta de desarrollo, un FPGA o similar, se optó por un microcontrolador por ser el dispositivo que se considera que contiene los elementos necesarios: memoria de programa y datos, módulo UART interno y pines de entrada-salida digitales. Consecuentemente se debe incorporar al diseño los elementos requeridos para su funcionamiento: cristal oscilador y elementos pasivos para la señal de reloj, circuitería de alimentación, etc.

Respecto a los motores paso-a-paso y los drivers a utilizar, no se cuenta con alguna restricción de diseño y en la implementación final puede variar las características de la estructura, por lo que no se pueden definir los parámetros que determinan los motores y drivers a utilizar. En cada caso, se deben valorar primero los criterios técnicos que respalden las características a definir por los motores y, consecuentemente, los driver; algunos criterios por valorar son la cantidad de torque necesario para mover los ejes a lo largo de la estructura y la resolución (ángulo de desplazamiento por cada paso de motor).

En el prototipo se utilizaron dos tipos de drivers: el SLA7026 que suministra una corriente de salida de 3 Amperios y que sirven para el manejo de motores de 1.41 watts, 10 Ohmios por fase, 7.3 grados por fase; el otro tipo, el THD-1801 que suministra hasta 5 Amperios se utilizan para el control de motores de 2.5V, 2.1Amperios por fase, 1.8 grados por fase.

Para la etapa del hilo de corte, si bien existen una serie de materiales que pueden servir como fuentes de calor (como acero inoxidable o las aleaciones tipo Cromel) y que se venden comercialmente en forma de hilos cilíndricos, existen sólo dos tipos que son los más utilizados en las cortadoras EPS: las aleaciones de Nicromo (Níquel-Cromo) y las aleaciones de Titanio. Las diferencias entre un tipo y otro radican en que las aleaciones de Titanio son más costosas y poseen mayor resistencia mecánica [1].

Sin embargo, se escogió usar hilos de Nicromo por varias razones: es el material más usado como hilo de corte por parte de las empresas en éste campo, además es de mejor accesibilidad por parte de los distribuidores en el país; interesa que el diseño esté enfocado al hilo de mayor uso comercial.

Ahora bien, el diseño de la etapa para controlar el hilo de corte no sólo es influenciado por las restricciones de diseño, sino además por las características del hilo de corte, de ahí la importancia de una investigación previa acerca de los hilos de corte disponibles y sus características.

A fin de poder determinar la forma de controlar la potencia del hilo de corte, se delimitaron premisas iniciales para simplificar el proceso de diseño:

- A. Debido a que el espacio de corte debe ser menor o igual a 0,5 milímetros, los diámetros de hilo de corte permitidos deben ser menores a ése tamaño (calibre AWG 25 como máximo).
- B. El intervalo de temperatura permitido ronda en el rango de 240°C y 400°C, pero para efectos de diseño se va suponer un rango de 200°C y 450°C para tener un poco de holgura.
- C. Dado que el bloque de EPS es trabajado con dimensiones estándar de 122cm x 122cm x 244cm (dato otorgado por las empresas visitadas) se trabajará con un largo de hilo de 265cm, tomando como base la dimensión más grande (244cm) y dando un poco de holgura para lo que corresponde a conexión en regletas y resortes de tensión mecánica.
- D. Se sabe que a menor diámetro del hilo, menor es la corriente necesaria para calentar el hilo a la temperatura que se desea, por tanto se considera el caso más extremo: con diámetro de 0,4547mm (calibre AWG 25) y una temperatura cercana a los 450°C (427°C para efectos de la tabla 3.4).
- E. La resistencia eléctrica se calculó tomando como referencia los hilos de Nicromo A y Nicromo C. La resistencia eléctrica, la tabla Corriente vs Temperatura y demás propiedades pueden variar dependiendo de la

composición del hilo empleado. Se prefirió éstos materiales porque son los que están mejor documentados, aparte que sus características son muy similares.

- F. Se consideró que, en teoría, la sublimación de material provocada por la potencia calorífica del hilo creará el espacio suficiente para que el hilo siga desplazándose a través del EPS, por lo que el hilo NUNCA deberá hacer contacto con el material. Con lo anterior, se descartan criterios mecánicos que supongan el rompimiento del hilo.

Para que el hilo se caliente a una temperatura de  $427^{\circ}\text{C}$ , es necesaria una intensidad de corriente eléctrica de 2,9 Amperios (según tabla 3.4), con la longitud del hilo definido y aplicando la tabla 3.3 para un calibre AWG 25, se aplica la ecuación (3.4), la resistencia eléctrica del hilo sería de 18,3 Ohm. Con la corriente y la resistencia determinadas se aplica la ecuación (3.5) y se determina que la tensión requerida es de 54,9 Voltios.

Una vez determinado el caso límite, conforme disminuye el diámetro de hilo usado, el voltaje requerido (para alcanzar la temperatura máxima) aumenta. Un ejemplo, para un diámetro de 0,1422mm, el voltaje requerido sería de 134V. De esto se concluye que la etapa de potencia del hilo de corte debe ser regulada en un intervalo de 54,9V en adelante, con el fin de poder manejar un intervalo de diámetros de hilo y de temperaturas de corte que puedan cumplir con los requisitos.

Por tanto, se decidió que el hilo de corte será alimentado con una tensión de alimentación de corriente alterna, regulada con control de ángulo de disparo (uso de TRIAC o SCR). El intervalo de diámetros a utilizar en el hilo de corte se encuentra entre 0.4547mm y 0.1600mm (entre calibre AWG25 y AWG34).

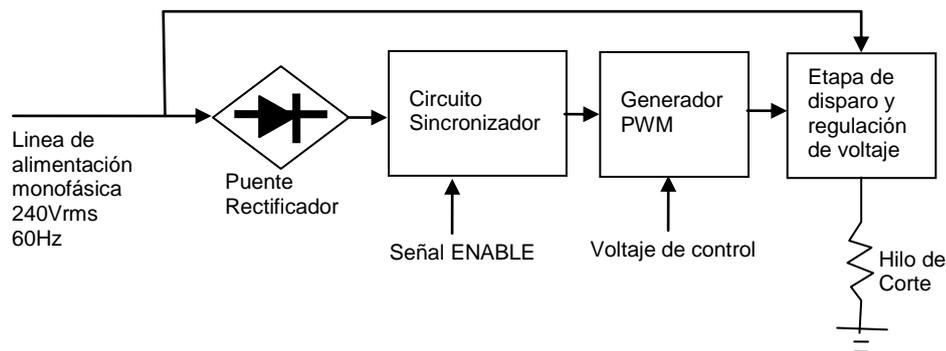
Se resume a continuación cada una de las secciones que componen la solución final:

- A. El software CAM podrá abrir archivos de formato HPGL e incluso ofrecerá una vista previa de la figura a cortar.

- B. El protocolo de comunicación PC-Máquina a utilizar será mediante puerto USB.
- C. El procesamiento de la información en la máquina estará a cargo de un microcontrolador, que comandará los driver de los motores y emitirá las señales de control del hilo de corte.
- D. La etapa de control del hilo de corte consistirá en una regulación por ángulo de disparo de la tensión eléctrica que alimentará al hilo de corte.

## 5.2 Descripción del hardware

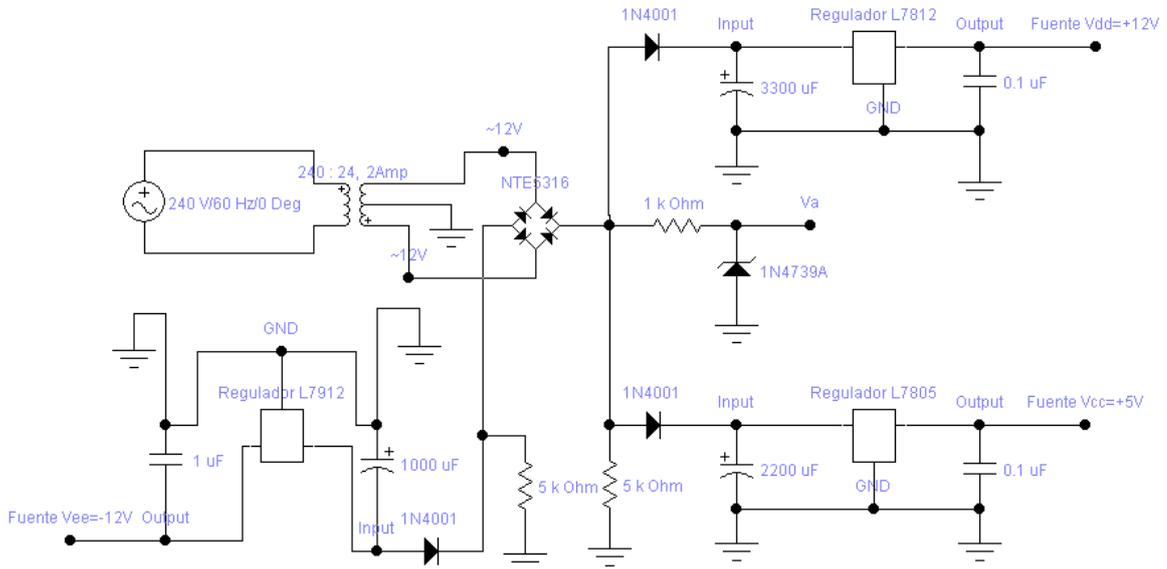
El diseño propuesto para la etapa de control y alimentación del hilo de corte se resume en el esquema de la figura 5.1. La línea de alimentación a considerar dentro del diseño es según el estándar de uso industrial: línea de tensión alterna monofásica de 240 Voltios RMS, con una frecuencia de 50 o 60 Hertz.



**Figura 5.1** Diagrama de bloques de la etapa de control para el hilo de corte.

El diseño consiste en una etapa de sincronización, donde la línea de tensión eléctrica proveniente de la fuente de alimentación es conectada a un regulador y la señal resultante es rectificada con un valor pico de 10 Voltios (por el efecto de un diodo Zener) para ser transferida a un detector de cruce por cero, esto permite que el generador de PWM esté “sincronizado” al doble de la frecuencia de la fuente de alimentación porque el control del ángulo de disparo se realiza tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo de la señal de alimentación. La figura 5.2 muestra el diagrama eléctrico para la etapa de rectificación, donde se obtiene la señal utilizada para el cruce por cero, así

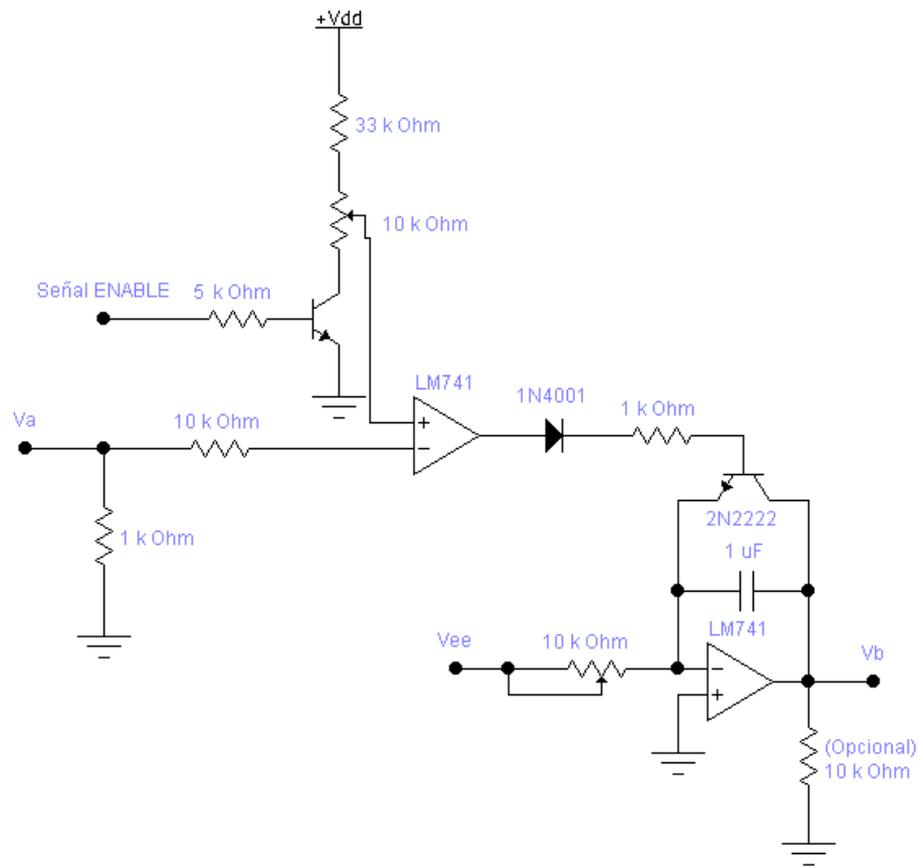
también se obtienen las tensiones eléctricas de +12V, -12V y +5V que alimentan los elementos del circuito.



**Figura 5.2** Diagrama eléctrico de la etapa de sincronización.

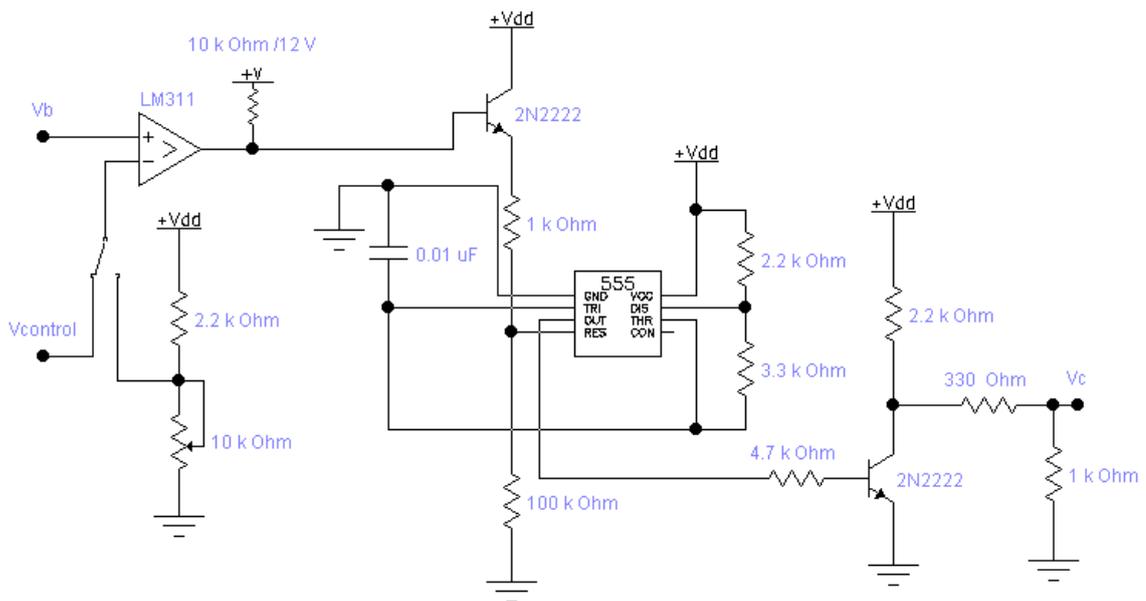
La señal generada por el detector de cruce por cero es la encargada de controlar un transistor conectado en la realimentación de un circuito integrador (ver figura 5.3), dicho transistor funciona como interruptor y la conmutación provocada en él hace que el integrador “reinicie” su señal, generando así una señal tipo diente de sierra.

El amplificador LM741 en el detector de cruce por cero funciona como comparador, donde en la patilla no-inversora se aplica el voltaje de referencia. Dicho voltaje es controlado por la señal digital ENABLE, entonces cuando el ENABLE está en bajo la tensión eléctrica de referencia es 12 Voltios y dado que la señal rectificada que llega a la patilla inversora no sobrepasa los 10 Voltios en la salida del amplificado no se tendrán los pulsos de cruce por cero, provocando que el control sea deshabilitado. Cuando el ENABLE está en alto, la tensión de referencia pasa a ser un valor cercano a los cero voltios y entonces en la salida se obtienen los pulsos de cruce por cero, habilitando el resto del control.



**Figura 5.3** Diagrama eléctrico del detector de cruce por cero y el generador diente de sierra.

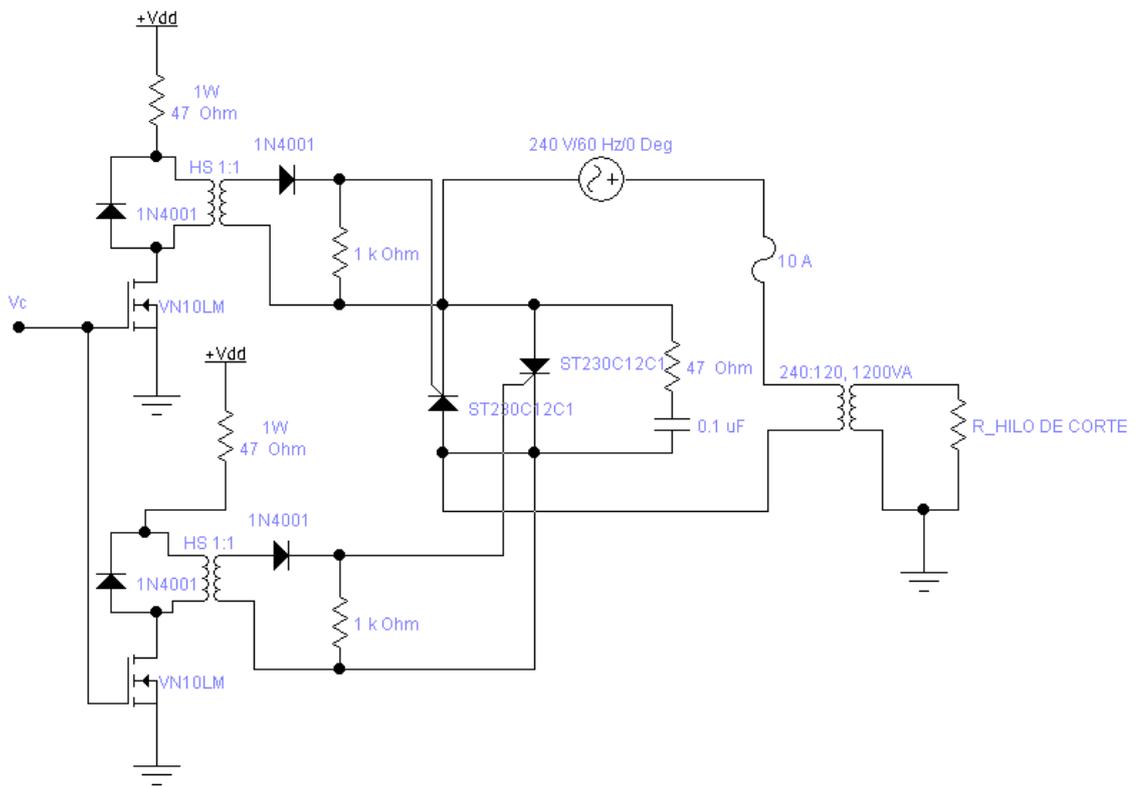
La señal diente de sierra llega a la patilla inversora de un comparador (ver figura 5.4), en la patilla no inversora tendrá conectado el voltaje de control que consistirá en una señal de corriente continua, pero ajustable en un rango de cero a diez Voltios, el voltaje de control será generado desde el control de los motores paso-a-paso. La forma de onda generada a la salida del comparador será una señal por modulación de ancho de pulso (PWM), el PWM controla un transistor que activa y desactiva el funcionamiento de un temporizador 555 que se encarga de generar una señal pulsante con frecuencia de 20kHz, con esto se logra convertir el ciclo en alto del PWM en una señal pulsante.



**Figura 5.4** Diagrama eléctrico del generador de PWM.

Finalmente la señal pulsante en la salida del 555 es la encargada de disparar los SCR de la figura 5.5 según el ciclo de trabajo del PWM, lo cual viene siendo el ajuste del ángulo de disparo con que se regula la tensión eléctrica que alimenta al hilo de corte, los transformadores de pulsos (HS 1:1) se encarga de aislar eléctricamente la etapa de control de la etapa de potencia puesto que ésta última trabaja con altas tensiones eléctricas.

El transformador de ésta etapa (240:120), aparte de cumplir con la función de regular el voltaje que le llega al hilo de corte, también cumple con la función de aislar galvánicamente el hilo de corte de la red de alimentación; al primario del circuito se incorporará un elemento de protección (Breaker o Fusible de 10 Amperios), en conformidad a como se exige en el Código Electrico Nacional [22], artículo 670, referente a maquinaria industrial.

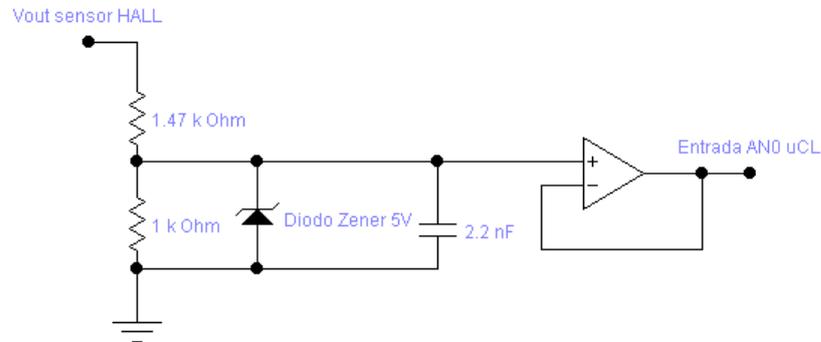


**Figura 5.5** Diagrama eléctrico para la etapa de disparo y regulación de voltaje.

Adicionalmente, con el fin de evitar una conducción “en falso” por parte de los SCR, se agregará una red Snubber como protección contra cambios bruscos de tensión eléctrica, los cálculos de la resistencia y el capacitor a utilizar se determinaron con base en los datos técnicos del SCR (ST230C12C1) (Ver apéndice A.2), en la implementación final se utilizaron los siguientes valores:  $R_S$  de 47 $\Omega$ , 5W y  $C_S$  de 0.1 $\mu$ F, 700V.

La conducción del hilo es monitoreada por medio de un sensor de HALL (91SS12-2, marca Honeywell), dicho sensor es alimentado con 12 Voltios y presenta en su salida un offset de 6 Voltios. Como la entrada analógica del microcontrolador trabaja en un rango de 0 a 5 Voltios se le puso a la salida del sensor un divisor de tensión para que la tensión eléctrica se mueva en dicho rango, con un offset de 2.5 Voltios. Como protección se incorporó también un diodo Zener de 5 Voltios en paralelo para evitar que sobrepase el valor límite, y también un capacitor de 2.2 nanoFaradios en paralelo para filtrar la señal contra

ruido. La señal llega a un seguidor de tensión, y después a la entrada AN0 del microcontrolador.

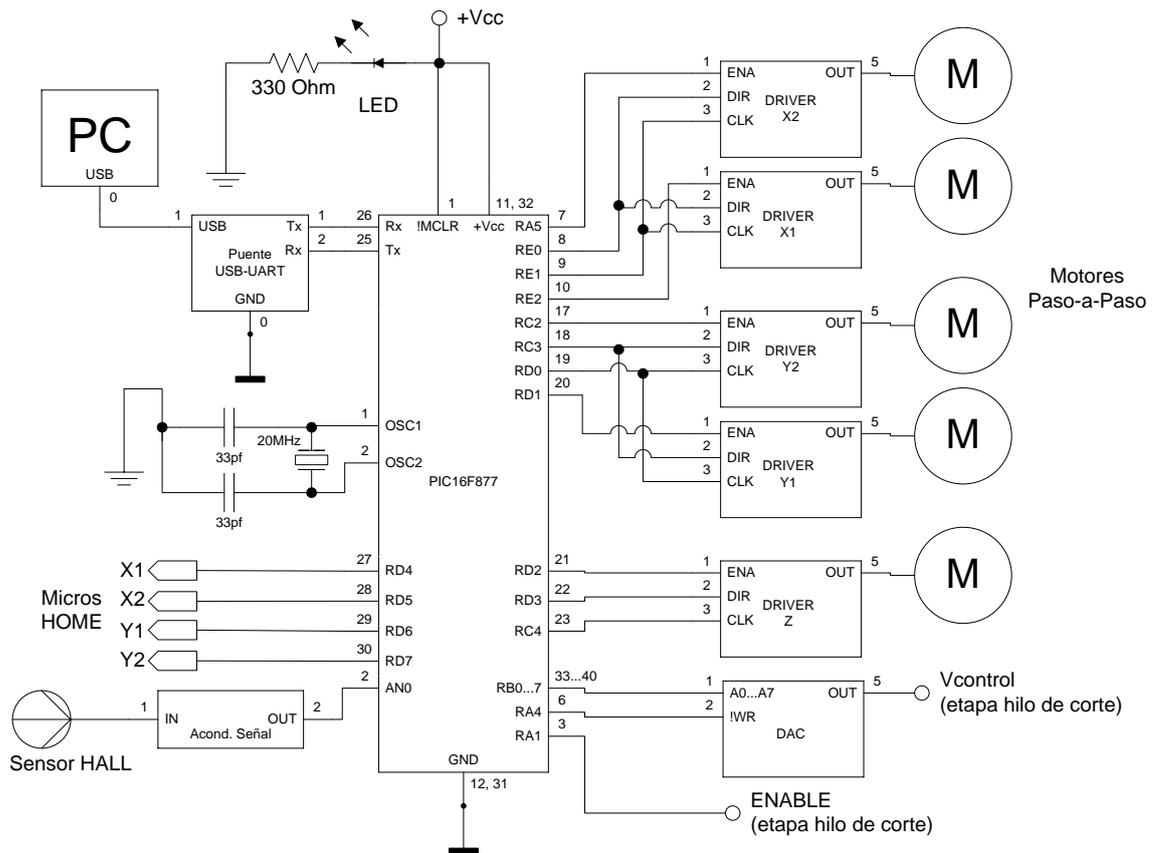


**Figura 5.6** Acondicionador de señal para el sensor de HALL.

Como elemento principal del sistema, se cuenta con el microcontrolador PIC16F877, pues el mismo es el “cerebro” de la máquina donde se generan todas las señales de control con base en las instrucciones provenientes de la PC (ver figura 5.7).

Los pines RC6/TX y RC7/RX, que corresponden respectivamente a las patillas de transmisión y recepción del modulo UART incorporado internamente en el microcontrolador, van asociadas a las patillas de recepción y transmisión del puente USB-UART. A través de dicho componente es que se establece comunicación con la PC.

Del microcontrolador se utilizan 11 salidas digitales como señales de control para los drivers que alimentan a los motores paso-a-paso, de las cuales se utilizan sólo tres para cada driver: ENABLE que habilita o deshabilita el movimiento del motor, DIRECTION que en bajo indica sentido horario y en alto indica sentido antihorario, y CLOCK que determina la velocidad con que se debe mover el motor. Tómese en cuenta que para los ejes X y Y se requieren dos drivers con sus respectivos motores (uno para cada extremo del hilo de corte), de ésta forma puede surgir el problema de que los motores utilizados en el movimiento de un eje queden en posiciones diferentes y que el hilo no quede en posición paralela al eje Z (que abarca el largo del hilo de corte).



**Figura 5.7** Diagrama de bloques propuesto para la sección 5.2.2.

Con el fin de corregir el problema anterior, cada pareja de ejes comparten las mismas señales de CLOCK y DIRECTION pero no el mismo ENABLE, entonces a la hora de mandar los ejes a HOME se maneja, por ejemplo, el eje X1 independientemente del eje X2 de manera que cuando éstos se encuentren en HOME, se garantice que están ubicados en la misma posición.

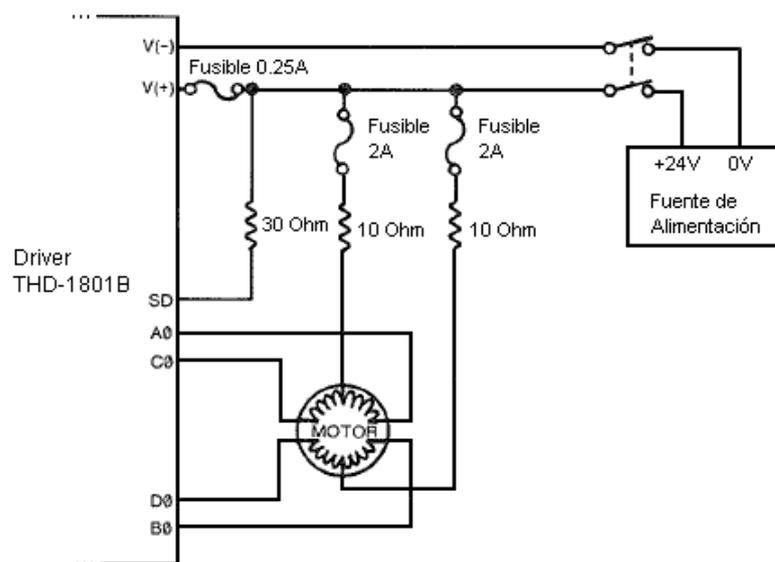
Las señales que indican el HOME o punto de referencia son generadas mediante interruptores (microswitches), las entradas RD4 a RD7 son utilizados para el monitoreo de dichas señales.

El microcontrolador es utilizado además para generar algunas señales de control de gran importancia en el manejo del hilo de corte. Los pines RB0 a RB7 se utilizan como salidas digitales hacia un convertidor digital/analógico (DAC0830) cuya salida analógica es el voltaje de control que determina el ciclo de trabajo del PWM, la actualización del LATCH interno del DAC0830 es realizado con la salida

digital RA4. Finalmente, la salida RA1 se utiliza para la señal ENABLE de la figura 5.3, dicha señal habilita o deshabilita el control sobre el hilo de corte.

Respecto a los motores paso-a-paso con sus respectivos drivers, se utilizaron los conceptos teóricos del capítulo 3 para la implementación y el acople dentro del sistema de control. Dicha implementación es provisional, dado que no se tiene un criterio técnico para definir el Torque necesario para mover la carga, pero de momento sirve para la realización de pruebas en vacío y eventualmente se volverían a aplicar los conceptos teóricos para cuando los motores se acoplen a la estructura.

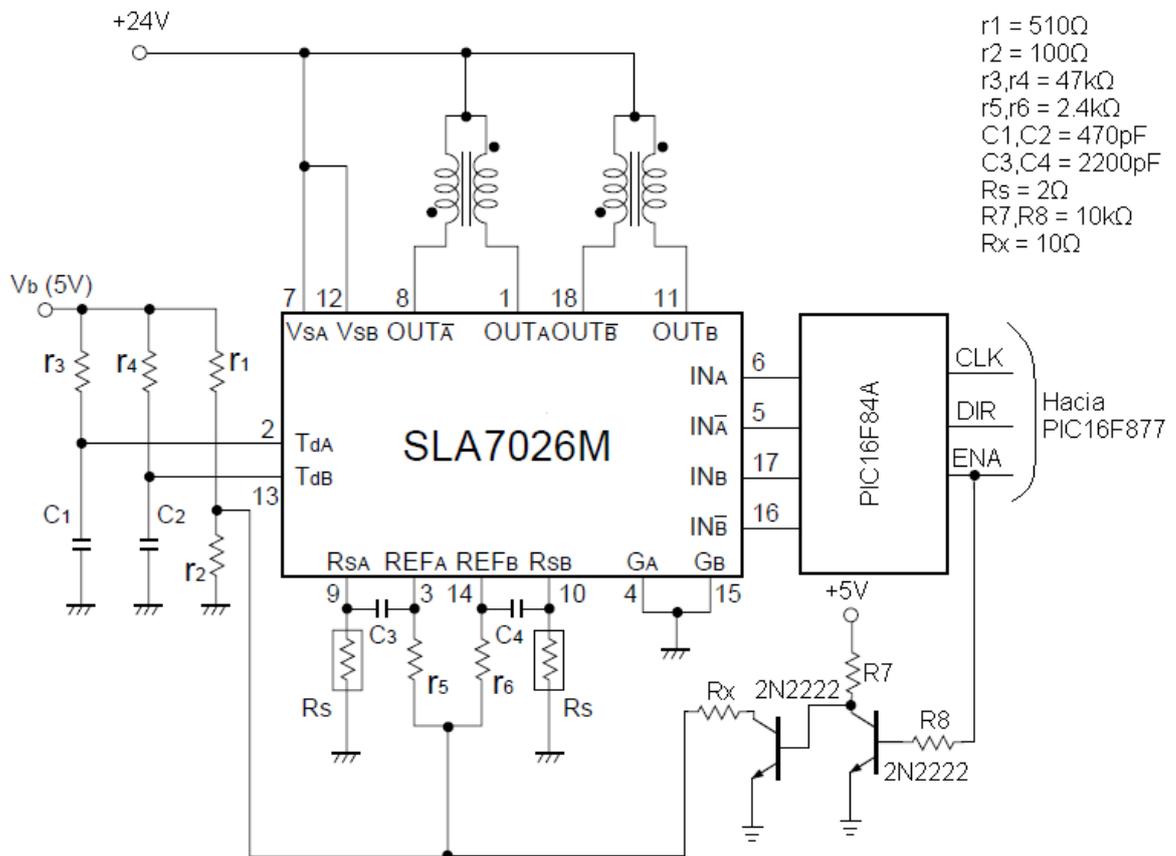
Para los ejes X1 y X2, se tiene previsto utilizar en cada eje el driver THD-1801B para controlar un motor de 2.5V/fase, 2.1A/fase, y utilizando una fuente de 24V, 10A para su alimentación (de hecho, ésta fuente se utilizará para alimentar todos los drivers de la máquina). Se aplicaron las ecuaciones (3.6) y (3.7) con los datos descritos anteriormente para obtener, en éste caso, una resistencia limitadora de la corriente eléctrica que alimenta las fases del motor; y como resultado, se obtuvo que la resistencia debe ser de 10Ω, 80W como mínimo. Adicionalmente se pensó en incorporar fusibles de 2 Amperios para proteger los devanados del motor. La conexión eléctrica del driver con el motor se muestra en la siguiente figura.



**Figura 5.8** Conexión eléctrica en el driver THD-1801B.

En los ejes Y1 y Y2, se piensa utilizar el driver SLA7026M para controlar un motor de 1.7Watts por fase y 10Ω/fase. En éste caso, se aplicó la ecuación 3.9 para establecer los componentes requeridos, la figura 5.9 muestra la conexión utilizada en el driver, junto con los valores de resistencias y capacitores utilizados.

Otro elemento a considerar fue que como el driver no genera la secuencia de fases para mover el motor, en las entradas se le conectó un microcontrolador PIC16F84A programado para generar la secuencia con base en las señales de CLOCK, DIRECTION y ENABLE. También se aprovechó la señal ENABLE para activar o desactivar el transistor que controla la conducción de la resistencia  $R_x$ .



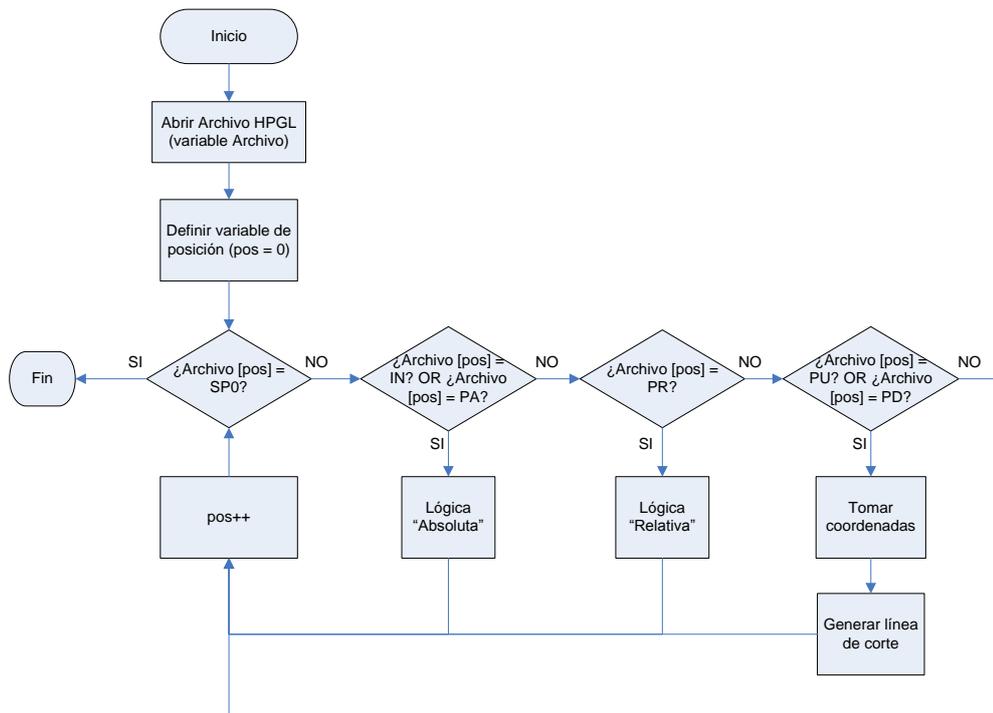
**Figura 5.9** Diagrama de conexión del driver SLA7026M.

### 5.3 Descripción del software

El paso inicial para el desarrollo del programa de computadora fue proponer un diagrama de flujo básico que consiste en realizar una lectura del

archivo de formato HPGL, analizar la información línea por línea y con base en ella generar la figura a cortar. A continuación se muestra el diagrama de flujo.

Este diagrama de flujo es útil para dos propósitos. El primero es cuando se abre el archivo con la figura a crear, el programa debe generar una vista previa de la figura en pantalla para que el usuario decida si ésta es la forma a cortar. El segundo propósito es cuando en definitiva el usuario ordena a la máquina que genere el corte.



**Figura 5.10** Diagrama de flujo para diseño inicial de programa.

Para los dos propósitos el algoritmo presenta variantes, por ejemplo, en el primer caso sólo se generan las líneas cuando el comando “Pen Down” haya sido detectado, en los otros comandos (Pen Up, Plot Relative, Plot Absolute) se guardan las coordenadas cuando sea necesario pero no implica generar una línea en pantalla. En el segundo caso se requiere primero hacer la lectura completa del archivo y reescribir la línea de comandos, aplicando el algoritmo de la figura 3.4, para después ir “dictando” las coordenadas a través del puerto USB y que el módulo de control de los motores paso-a-paso genere los movimientos de la máquina.

Dado que para la implementación del algoritmo se requería familiarizar el cómo utilizar algunas librerías de JAVA a fin de simplificar la construcción del programa, fue necesario crear pequeños programas de prueba, cada uno con un micro-objetivo que complementa el esquema del algoritmo propuesto, se resumen los micro-objetivos:

- A. Abrir un archivo con extensión “.plt” y mostrar en la consola de JAVA el código HPGL guardado en el archivo. Se utilizaron las clases: JFileChooser, FileReader, BufferedReader y el método readLine().
- B. Generar líneas y figuras geométricas dentro de la interfaz gráfica del programa. Se utilizó la librería Graphics con el método drawLine(), el objeto gráfico generado es contenido dentro de un JScrollPane.
- C. Mezclar lo obtenido en los objetivos anteriores para crear un programa que realiza una revisión línea-por-línea del archivo y con base en los comandos leídos generar la figura en pantalla.

Describiendo un poco la lógica del tercer programa de prueba, primero se determinan las coordenadas del punto inicial y el punto final necesarias para generar la línea, dichas coordenadas se pasa a un arreglo de variables tipo Integer y después son convertidas a un objeto de JAVA, el objeto mantiene la misma estructura del arreglo pero la conversión es necesaria para que las variables puedan ser cargadas en el método “paintComponent(Graphics g)” requerido para generar la figura en pantalla.

Los objetos JAVA generados son almacenados en una clase tipo ArrayList, el ArrayList proporciona la ventaja de expandir su tamaño cada vez que se agregan más elementos, por lo que sirve como una especie de buffer temporal. Cuando se termina la lectura de todo el archivo, el buffer generado se transfiere al método paintComponent que se encarga de convertir todos los elementos del buffer a líneas geométricas. Se ilustra las partes del buffer implementado.

**Tabla 5.1** Descripción del buffer implementado.

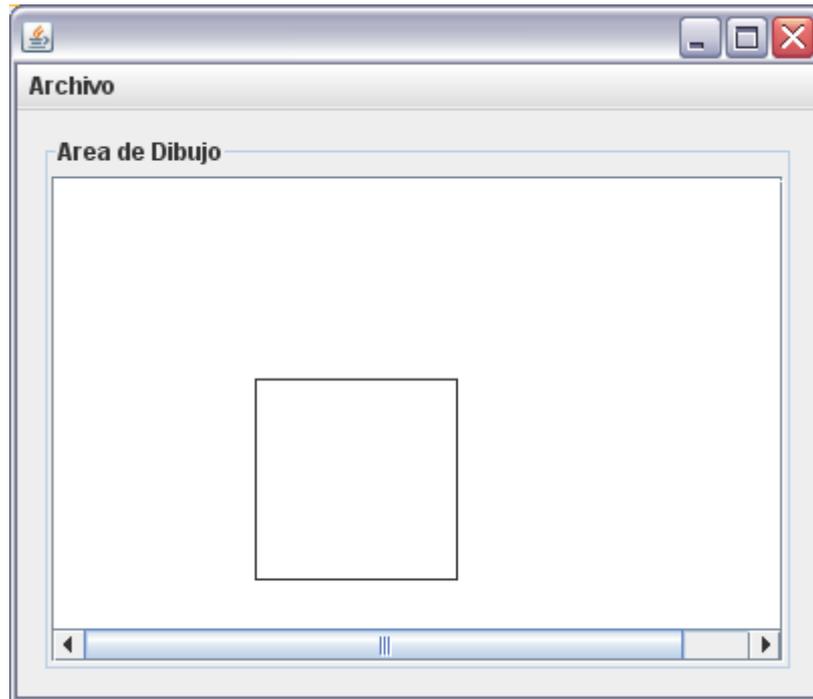
Array/List	Indice	Coordenadas			
	(1)	X1	Y1	X2	Y2
(2)	X1	Y1	X2	Y2	
(3)	X1	Y1	X2	Y2	
...					
(N)	X1	Y2	X2	Y2	

Cabe destacar que éste tipo de estructura se utilizó en los algoritmos de la siguiente sección para dividir o almacenar la información. Aparte del buffer que almacena los puntos inicial y final, el programa devuelve otro buffer al que se denominó “buffer\_pr” (o buffer provisional), pero en vez del punto inicial almacena un valor llamado “numero de objeto” (o numero de figura, no confundir con objeto JAVA), empieza de cero y sube de valor por cada comando “Pen Down”, esto ayuda a diferenciar puntos correspondientes a diferentes figuras geométricas. Esto tiene utilidad para los algoritmos de la siguiente sección. La tabla 5.2 muestra la estructura de “buffer\_pr”.

**Tabla 5.2** Estructura de “buffer\_pr”.

Array/List	Indice	Contenido			
	(1)	Figura1	0	X2	Y2
(2)	Figura1	0	X2	Y2	
...					
(10)	Figura2	0	X2	Y2	
...					
(N)	FiguraN	0	X2	Y2	

Para comprobar el funcionamiento del programa de prueba 3, se probó abriendo un archivo que contiene los comandos para generar la figura de un cuadrado, se muestra a continuación una captura en pantalla del programa implementado.



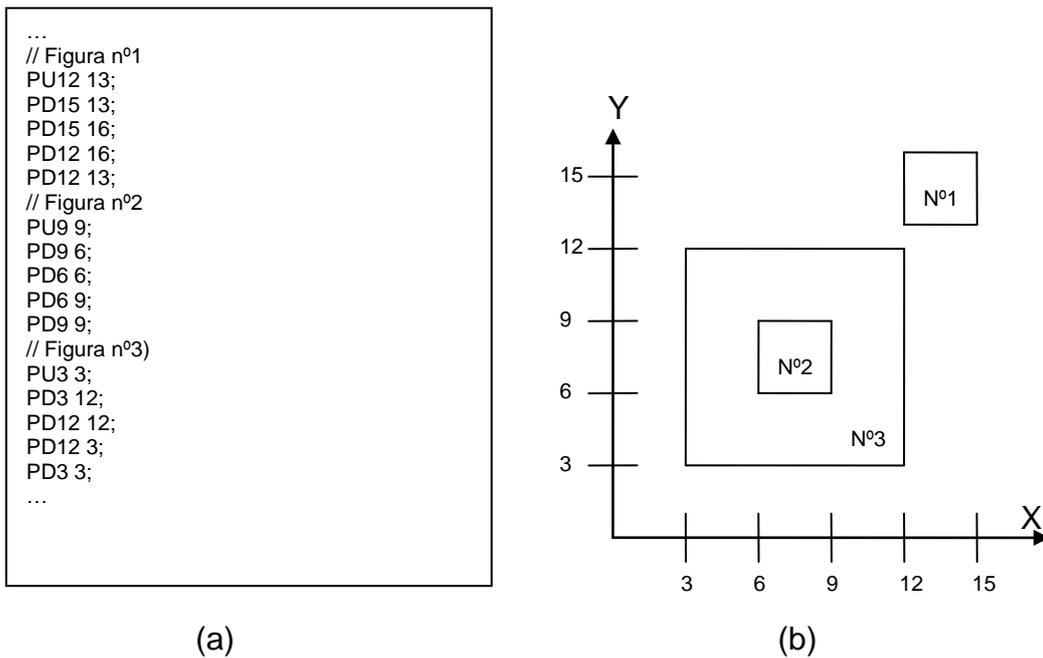
**Figura 5.11** Interfaz gráfica del programa de prueba 3.

Tras haber obtenido una versión satisfactoria del programa planteado, se realizaron algunas depuraciones, como por ejemplo limpiar el espacio en pantalla donde se genera la figura cada vez que se abre una figura nueva, también ajustar el tamaño de la figura dentro del área de dibujo de manera que se pueda visualizar el archivo entero a escala sin importar su tamaño, y también auto-centrar la figura puesto que la figura creada en el archivo podría tener coordenadas en el eje negativo, se busca que todo los puntos coordenados estén en el eje positivo.

El siguiente paso en el desarrollo del programa es el algoritmo que analiza los puntos, o bien, la(s) figura(s) geométricas a cortar y determina la ruta a seguir por el hilo de corte, a éste algoritmo se le llamó “Algoritmo de Mejor Ruta”, y para comprender un poco esto, hay que retomar parte de lo explicado en la sección 3.1, junto con el algoritmo de la figura 3.4, pero desde el punto de vista del archivo HPGL. Hay que aclarar que los algoritmos están enfocados al manejo exclusivo de figuras geométricas, no interesa el manejo de segmentos o líneas porque no tiene aplicación práctica en las cortadoras de EPS.

El archivo de formato HPGL que se abre para la creación de la figura no necesariamente tiene sus puntos en forma ordenada en función de la ruta a seguir por el hilo de corte. Como se puede observar en el ejemplo de la Figura 5.12, el archivo inicia describiendo los puntos que conforman el cuadrado etiquetado como n°1, nótese dos cosas:

- A. Al empezar con la figura geométrica (cuadrado) más lejana al origen, el desplazamiento desde el origen o punto  $\{0; 0\}$  hacia el primer punto coordenado que da el archivo, es decir, el punto  $\{12; 13\}$  implica que tenga que pasar por en medio de las otras dos figuras.
- B. El orden de los puntos que conforman dicha figura es en sentido anti-horario, dado que del punto  $\{12; 13\}$  pasa al punto  $\{15; 13\}$  en vez del punto  $\{12; 16\}$ .

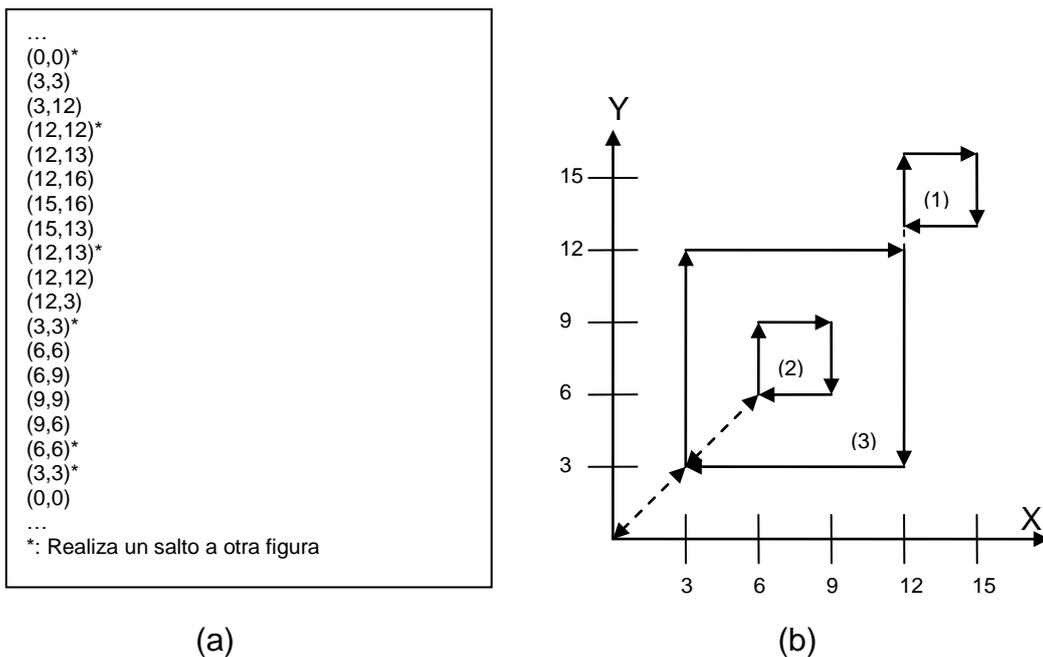


**Figura 5.12** (a) Ejemplo de un fragmento de archivo HPGL. (b) Representación de la información del archivo.

Otro aspecto a destacar de la figura 5.12 es que el orden a seguir de los puntos implica que se tenga que recorrer mayor camino, no sería un trazado

óptimo. Se resume entonces las reglas a seguir para el trazado de las líneas en el corte con EPS:

- A. Se empieza desde el origen o punto  $\{0; 0\}$  hacia el punto más cercano de todo el arreglo.
- B. Se sigue el contorno de la figura geométrica en sentido horario, esto tiene fundamento en que si se empieza por el contorno de abajo (puntos más cercanos a la intersección del eje X) la figura tiende a caer en el espacio creado por el corte, entonces a la hora de cortar la parte superior se pierde precisión.
- C. Cuando se requiere cortar más de una figura, se empieza por la figura geométrica más cercana al origen, luego va realizando el contorno hasta que salta a la siguiente figura más cercana, y así sucesivamente. No importa que no se haya terminado el contorno de la figura, que más adelante el hilo se devolverá para terminar el contorno.
- D. No puede existir más de un salto entre dos figuras, llámese a un salto “redundante” al salto que está de más.
- E. Se va saltando de contorno en contorno hasta que llega a una figura que no requiere hacer más de un salto, en éste caso se completa el contorno y se devuelve por el mismo salto hacia la figura anterior.
- F. Cuando el hilo “regresa” a una figura geométrica incompleta se termina de realizar el contorno, si requiere saltar a otra figura se realiza el salto pero el hilo debe devolverse al punto del salto para terminar la figura, y así sucesivamente hasta regresar al origen tras haber recortado todas las figuras.

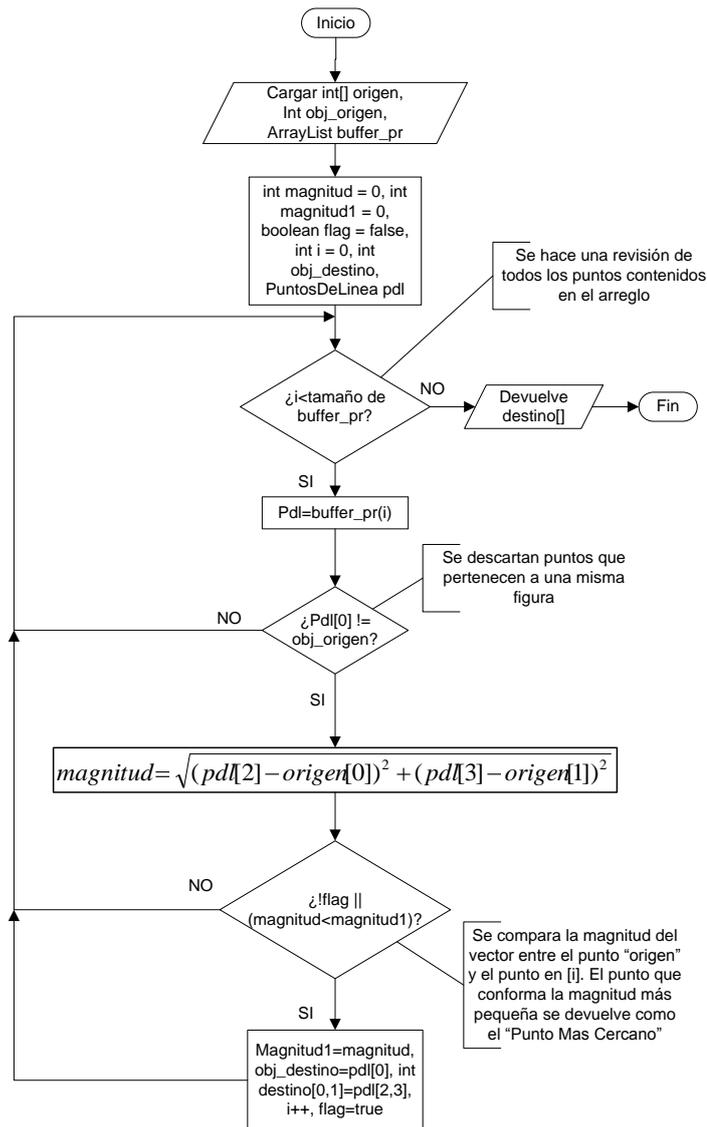


**Figura 5.13** (a) Lista de puntos reordenados según las reglas de corte. (b) Representación de la ruta a seguir por el hilo de corte.

Las reglas anteriores garantizan el menor desplazamiento posible para el trazado de las figuras. Para ilustrar como aplican estas reglas a la figura 5.12, se muestra entonces la figura 5.13 que ordena los puntos según las reglas descritas.

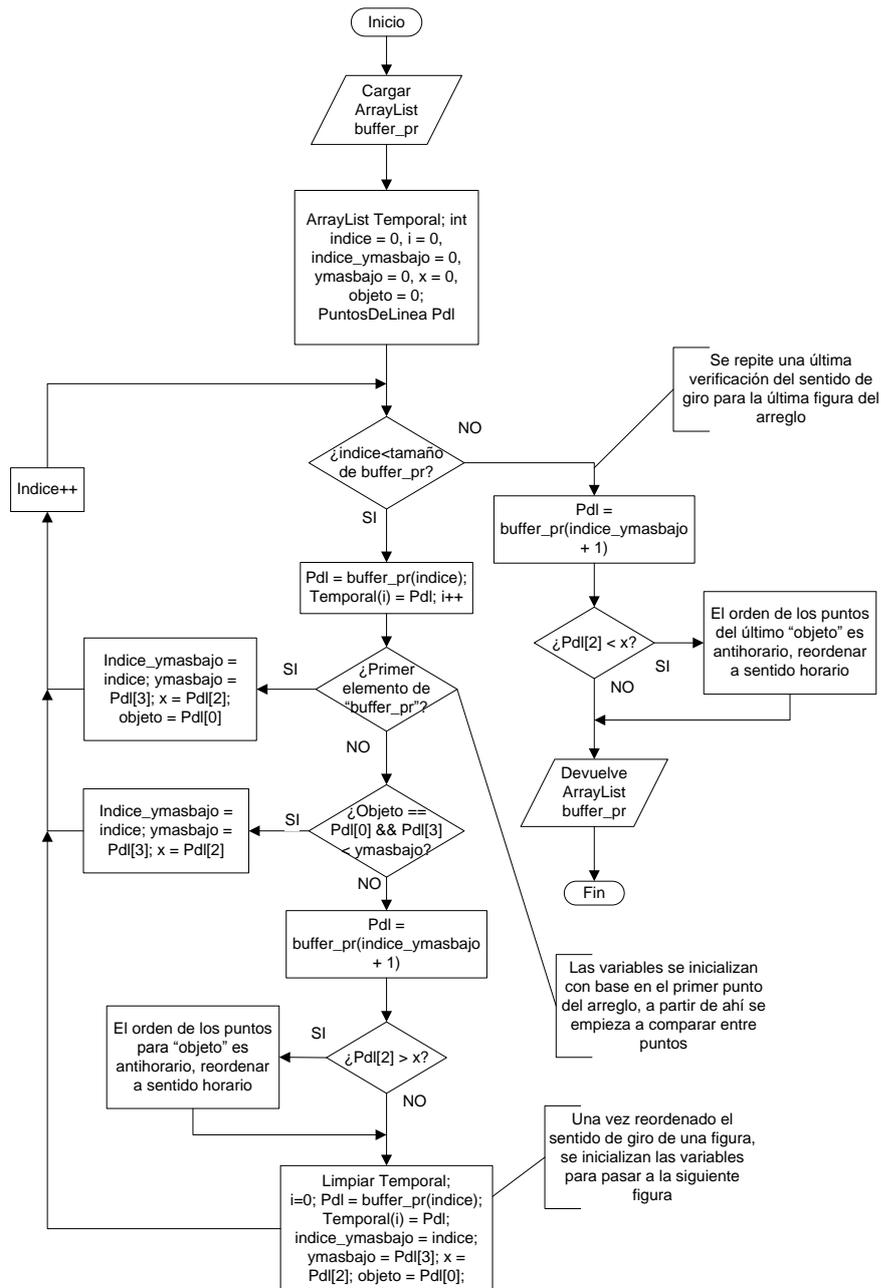
Dado que hay que reordenar los puntos contenidos en el archivo HPGL antes de realizar el trazado de corte, se planteó una serie de algoritmos que forman parte del software CAM, dichos algoritmos se encargan de reordenar los puntos y los almacena en un buffer, después mediante comandos implementados para la comunicación con el módulo de control se transmiten las coordenadas siguiendo el orden del buffer.

El primer algoritmo es el de la figura 5.14 y corresponde a la rutina llamada “punto más cercano”, tiene como variable de entrada un punto coordinado y consiste en revisar todos los puntos del archivo con el fin de identificar el punto más cercano fuera de la figura, es decir, viendo de nuevo la figura 5.13, para el cuadrado nº 2 sólo devuelve el punto más cercano de entre los puntos de los cuadrados nº 1 y nº 3. El algoritmo se apoya en la estructura del “buffer\_pr” descrito en la sección anterior para diferenciar puntos de una misma figura.



**Figura 5.14** Diagrama de flujo para el algoritmo “Punto mas cercano”

El siguiente algoritmo –denominado “OrdenCW”- (ver figura 5.15) reordena en el “buffer\_pr” los puntos para una misma figura geométrica, pero reordena sólo en el caso de las figuras geométricas ordenadas en sentido anti-horario, de manera que el orden de los puntos de una figura tenga sentido horario. Para esto, se determina cual de los puntos de una misma figura geométrica es más cercano a la intersección con el eje X (es decir, con la menor coordenada en Y), y lo compara con el punto siguiente en el orden del buffer; si para el punto siguiente la coordenada en X tiende a alejarse del origen se determina que el orden es antihorario y se reordena, en caso contrario el orden se mantiene.



**Figura 5.15** Diagrama de flujo para algoritmo de “OrdenCW”

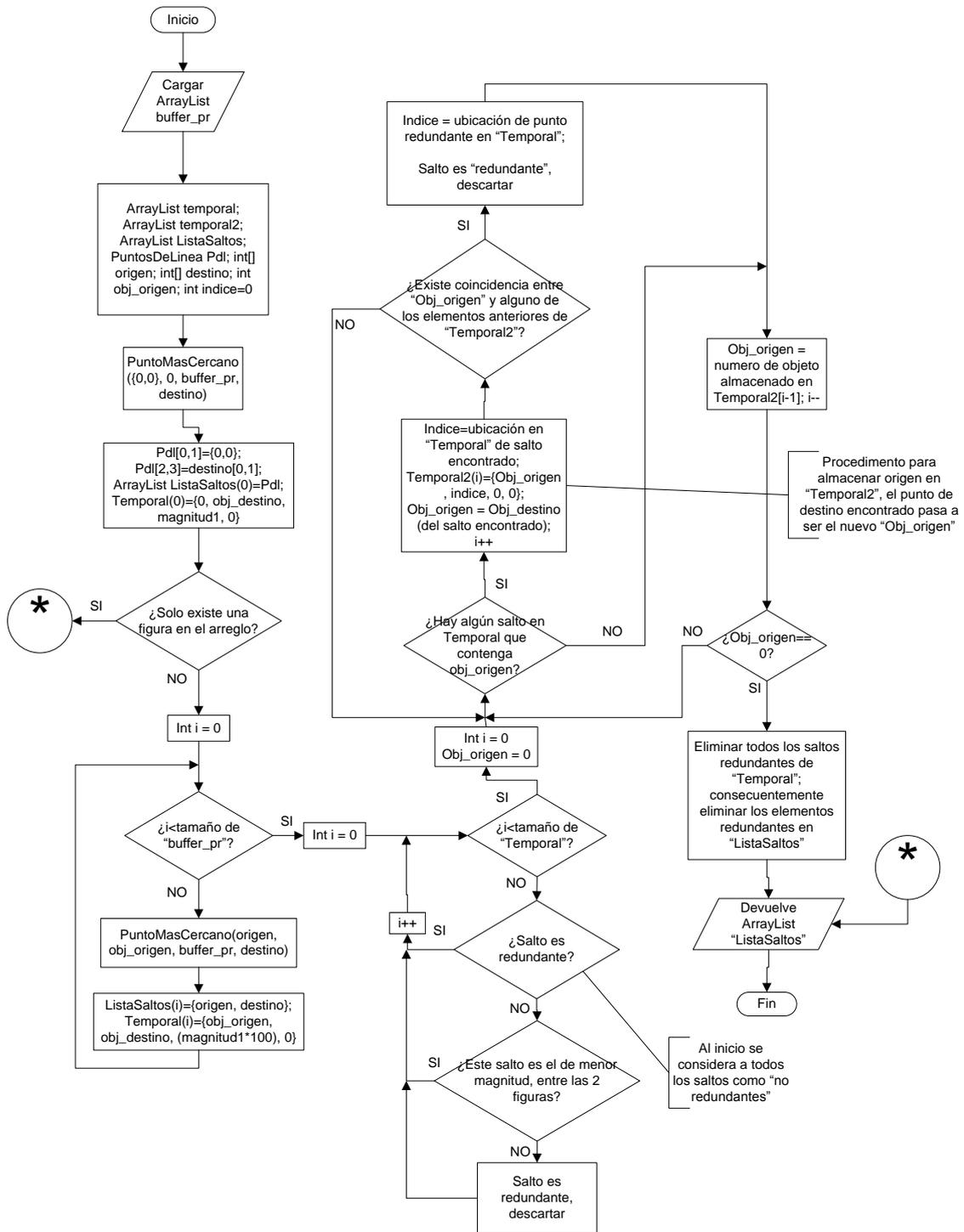
El algoritmo de la figura 5.16 se denomina “Análisis de figuras”, y es el algoritmo más complejo porque es el encargado de determinar los “saltos” entre figuras geométricas. Consiste en un proceso de tres pasos que ayudan a denificar los saltos más adecuados con base en las reglas a seguir por el trazado de la ruta, se describen:

- A. Para el punto {0; 0} y todos los puntos del arreglo se aplica el algoritmo de “Punto más cercano” para que éste devuelva el punto de destino, en un buffer llamado “Lista de saltos” se almacena las coordenadas tanto del origen como del destino; en otro buffer llamado “temporal” almacena los siguientes datos: numero de objeto de origen, numero de objeto destino, magnitud del salto y un espacio que se rellena con cero pero que después se utilizará para descartar puntos “redundantes”.

**Tabla 5.3** Estructura de “temporal”.

		Indice	Contenido		
ArrayList	(1)	Obj_origen	Obj_destino	Magnitud	Redundancia (0/1)
	(2)	Obj_origen	Obj_destino	Magnitud	Redundancia (0/1)
		...			
	(10)	Obj_origen	Obj_destino	Magnitud	Redundancia (0/1)
		...			
	(N)	Obj_origen	Obj_destino	Magnitud	Redundancia (0/1)

- B. Se analiza el contenido del buffer “temporal”, para dos objetos con más de un salto entre ellos se deja únicamente el que contiene la menor magnitud y el resto se descarta poniendo un uno en la casilla de “redundancia” (ver tabla 5.3).
- C. Se le hace un seguimiento a los saltos que quedan. Para esto se genera un bucle que empieza con el origen (que en “temporal” es etiquetado como “objeto cero”) se busca algún salto que incluya al origen, se almacena el objeto de origen en “temporal2” junto con el índice del salto (ver tabla 5.4), el objeto de destino pasa a ser el objeto de origen, se repite sucesivamente. Por cada nuevo origen se compara con los objetos almacenados en “temporal2” que representa los objetos anteriores; si el objeto actual se repite dentro de alguno de los objetos anteriores significa que para un mismo objeto hay más de un camino y por tanto existe un salto “redundante”, se elige eliminar el último salto porque suele ser el salto más alejado del punto {0; 0} en comparación con el otro salto que apunta al mismo objeto. Si no se encuentran más saltos se devuelve al objeto anterior y así hasta volver al objeto cero.



**Figura 5.16** Diagrama de flujo para el algoritmo “Análisis de Figuras”.

Tras haber ejecutado los tres pasos anteriores, los saltos detectados como “redundantes” son eliminados de la “Lista de saltos”, dejando solamente los saltos que cumplen con las reglas planteadas para el trazado de líneas.

**Tabla 5.4** Estructura de “temporal2”

	Indice	Contenido			
ArrayList	(1)	Obj_origen	Indice de salto en “temporal”	0	0
	(2)	Obj_origen	Indice de salto en “temporal”	0	0
	...				
	(10)	Obj_origen	Indice de salto en “temporal”	0	0
	...				
(N)	Obj_origen	Indice de salto en “temporal”	0	0	

Finalmente, el algoritmo “simulación de corte” (ver figura 5.17) es el que se encarga de devolver la lista ordenada de puntos de la(s) figura(s) a cortar pero ordenadas según la ruta que se debe seguir. La lógica se apoya en la información contenida en “buffer\_pr” y en “lista de saltos” para devolver un arreglo llamado “lista ordenada” que posee la misma estructura de la tabla 5.1; las coordenadas a transmitir por el control de la máquina estarán en función de la secuencia que guarda la “lista ordenada”.

En la figura 5.18 se muestran ejemplos de figuras que se utilizaron para probar los algoritmos planteados, primero aparece una representación de la figura con base en la información del archivo, y seguidamente se le agregan las líneas de salto que formarían parte de la ruta a seguir.

Cuando el usuario ordene mandar a crear la figura de corte, el programa aplica los algoritmos anteriores para obtener el arreglo “ListaOrdenada”, entonces se entra en un bucle donde se transmite las instrucciones hacia el control por medio del puerto USB y siguiendo el protocolo de los comandos implementados.

Para cada desplazamiento desde la posición actual hacia el punto de destino, primero se calcula la velocidad de cada eje; como la velocidad es un vector, se obtienen las componentes en los ejes X y Y, la velocidad requerida en cada eje es determinada para ser transmitida al módulo de control por medio del comando “VC” (los comandos de comunicación PC-Control se discutirán más adelante). Una vez que el control responde, se procede entonces a enviar el comando “PO” para ordenar el desplazamiento hacia el punto de destino, y cuando el control indica que se llegó al destino se continúa con el punto siguiente hasta completar la o las figuras a crear. Durante el proceso, el control envía

comandos indicando el estado del hilo de corte, lo cual es verificado por el programa de software y si se determina que hay una falla en el hilo de corte, el proceso es detenido y se muestra un mensaje informando al usuario sobre dicha falla.

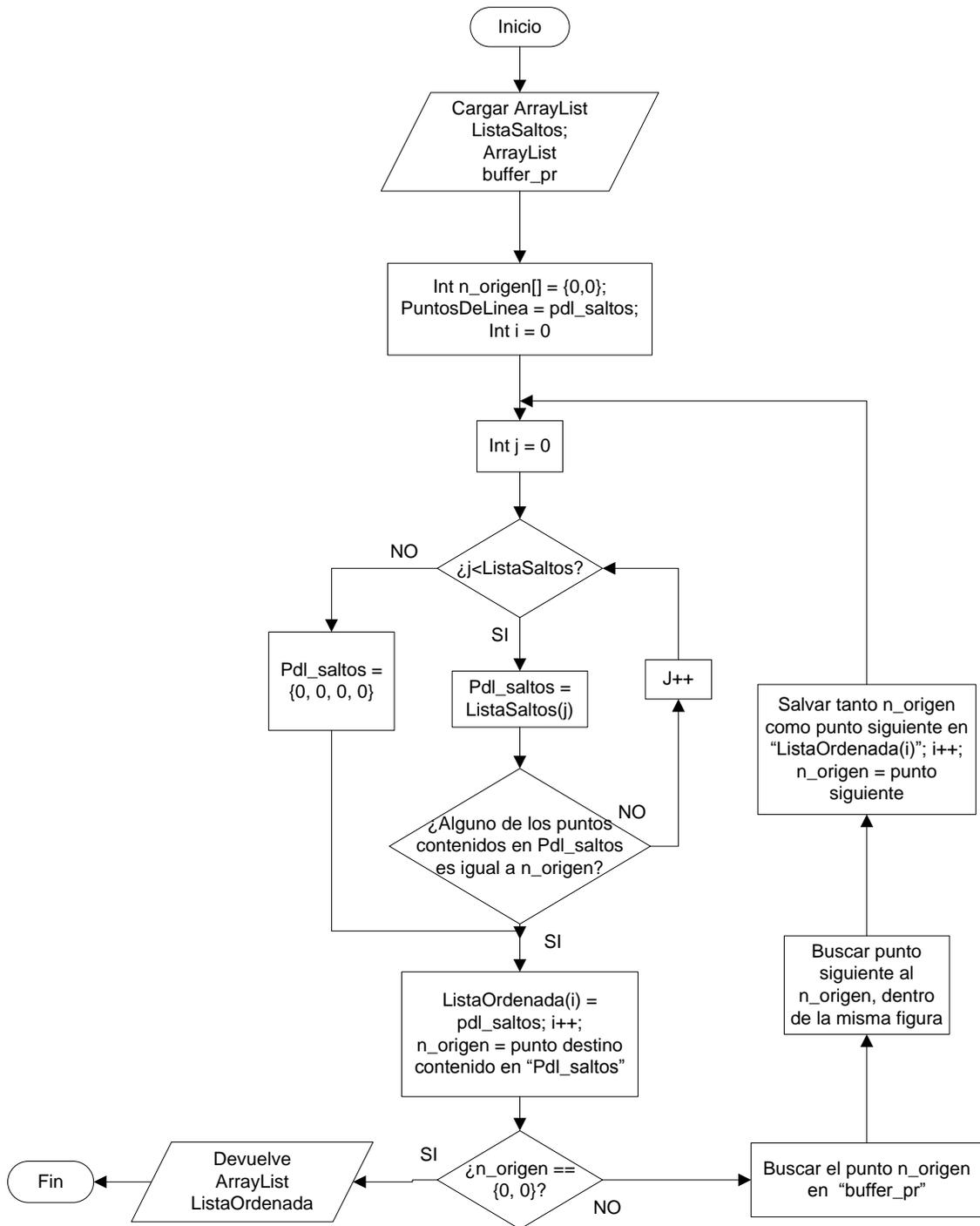
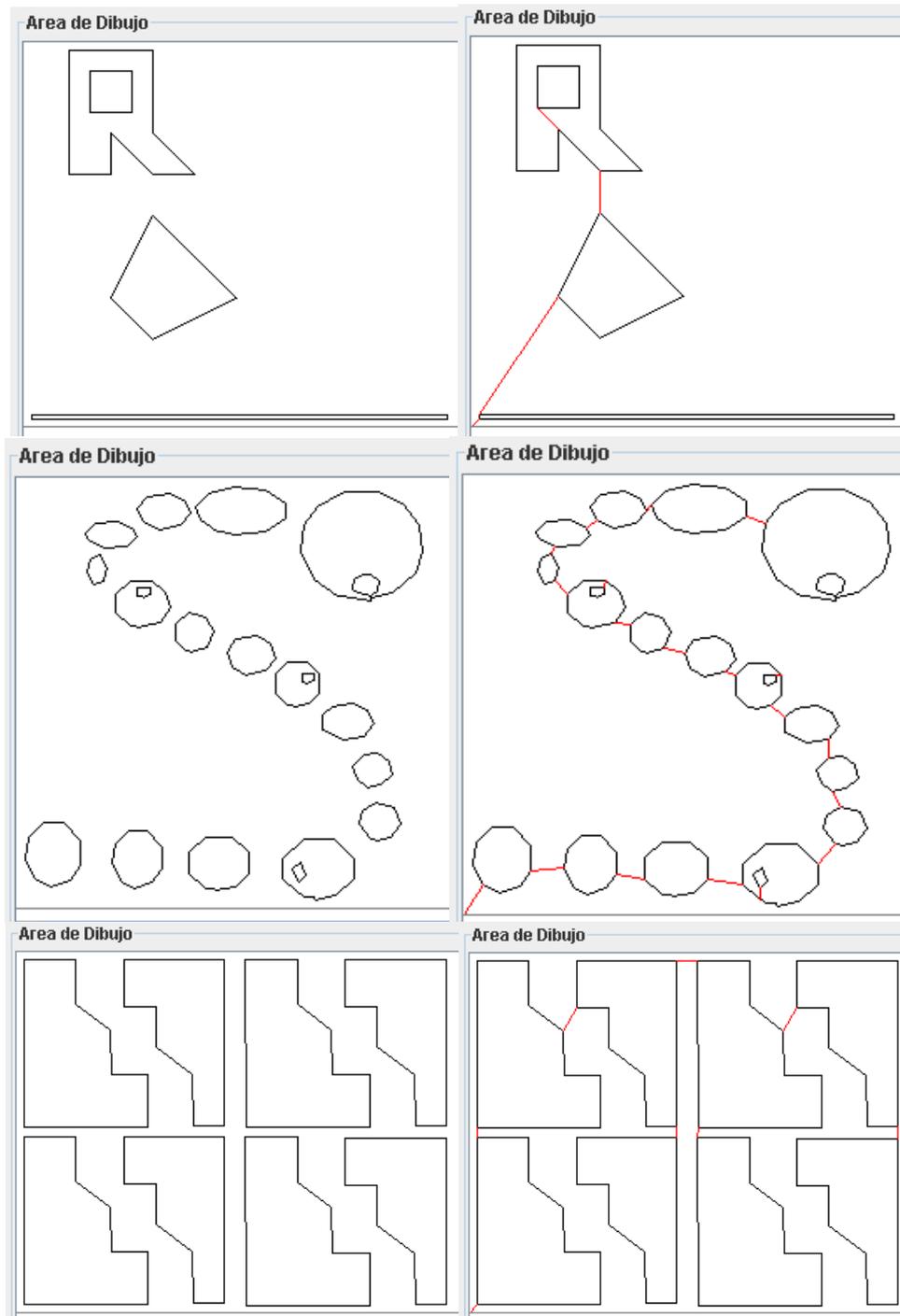


Figura 5.17 Diagrama de flujo para el algoritmo "simulación de corte".



(A)

(B)

**Figura 5.18** (A) Despliegue en pantalla de las figuras sin aplicar los algoritmos. (B) Figuras en pantalla junto con las líneas de salto obtenidas.

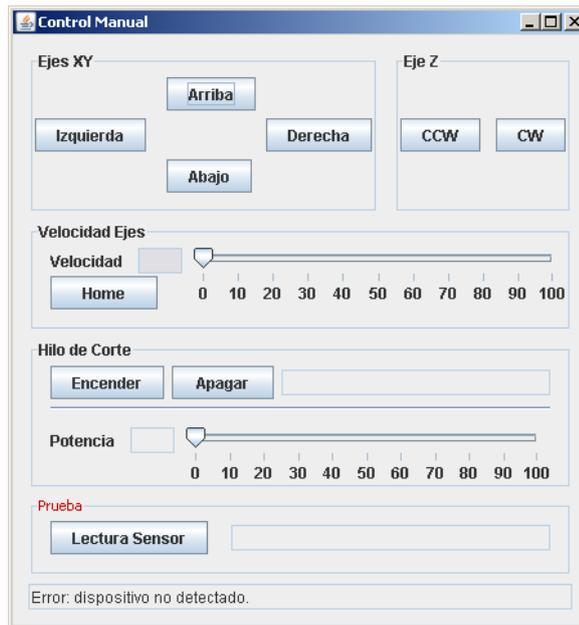
Como parte de la Interfaz gráfica que contará el usuario para el control de la máquina, se incorporó además una sección para el control manual de la máquina. A diferencia del control numérico computarizado que genera las

instrucciones en forma automática con base en la información especificada, el control manual le permite al usuario tener libre control sobre el movimiento de los ejes junto con el hilo de corte.

Esta parte del programa no sólo tiene por objetivo que el usuario tenga control individual de cada uno de los elementos que componen la máquina, también sirvió para probar de forma individual los comandos implementados para la comunicación entre la computadora y el control de la máquina, respecto a dichos comandos serán detallados en la sección 5.3.4.

La figura 5.19 muestra la interfaz gráfica implementada para el control manual, de donde se detallan las funciones implementadas a continuación.

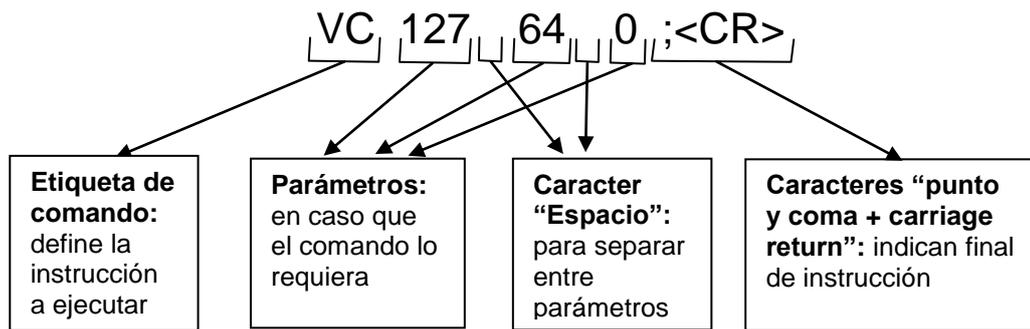
- A. Ejes XY, Eje Z: sirven para mover individualmente los ejes de la máquina, la mecánica de los botones gráficos es similar a la función JOG: el eje se mantiene moviendo mientras el botón esté presionado.
- B. Velocidad de ejes: se trata de un cursor que regula la velocidad de movimiento; se representa en porcentajes, donde cero es la velocidad mínima y 100 representa la velocidad máxima; incluye el botón "HOME" para ordenar a la máquina realizar la secuencia de HOME (ver sección 5.3.4).
- C. Hilo de Corte: se compone de dos botones para el encendido y apagado del hilo de corte, junto con un cursor para regular la potencia, cero representa la potencia mínima y 100 representa la potencia máxima (en los SCR representa un ángulo de disparo de cero grados). A la par, se agrega un cuadro de mensajes para informar el estado del hilo de corte.
- D. Prueba: sirve para obtener lecturas del sensor en un periodo de la frecuencia de alimentación, en el cuadro de mensajes aparece el valor máximo y el valor mínimo de las lecturas hechas, lo cual ayuda a determinar el estado del hilo.



**Figura 5.19** Interfaz gráfica del control manual.

Para la comunicación PC-Control, con el uso de un puente USB-UART la lógica de transmisión y recepción de datos no presenta diferencia alguna respecto a una comunicación tipo serial RS-232, sin embargo, quedaba como decisión abierta la estructura que compondría la trama de datos, es decir, bajo qué lenguaje le iba a transmitir la PC las instrucciones al control, y de igual forma el cómo el control le iba responder a la PC.

Entonces se diseñaron un protocolo de comunicación específico para ésta máquina, se trata de una serie de comandos basados en las funciones necesarias para el manejo de todos los elementos de control, consiste básicamente de dos caracteres ASCII iniciales que indican el tipo de función a realizar, seguido por una cadena de valores ASCII separados por “espacio” en caso que el comando los requiera, y los caracteres de “punto y coma” y “carriage return” para indicar el fin del comando. La siguiente figura muestra la estructura del formato implementado.



**Figura 5.20** Estructura de la trama de comunicación.

Tras haberse definido la trama de comunicación, se diseñaron una serie de comandos con base en los parámetros a manejar en la máquina, dichos comandos se explicarán más adelante.

El programa principal del microcontrolador, una vez inicializadas tanto variables a utilizar como las entradas y salidas, ejecuta un bucle sin fin en donde se espera una instrucción de parte de la PC. Cuando se está dando una recepción de datos en el módulo USART del microcontrolador, se genera una interrupción en el programa para guardar el comando en un buffer llamado "instr", entonces se vuelve al programa principal para que el algoritmo del programa principal se encargue de interpretar el comando y así ejecutar la instrucción. Cada vez que se ejecuta una instrucción, el control envía a su vez comandos hacia la PC que indican el estado del sistema.

Como se puede ver en la figura 5.20, dependiendo de la "etiqueta de comando" se realiza una rutina que se encarga de ejecutar la instrucción ordenada. Ahora se va a explicar de primero los comandos enviados hacia el control.

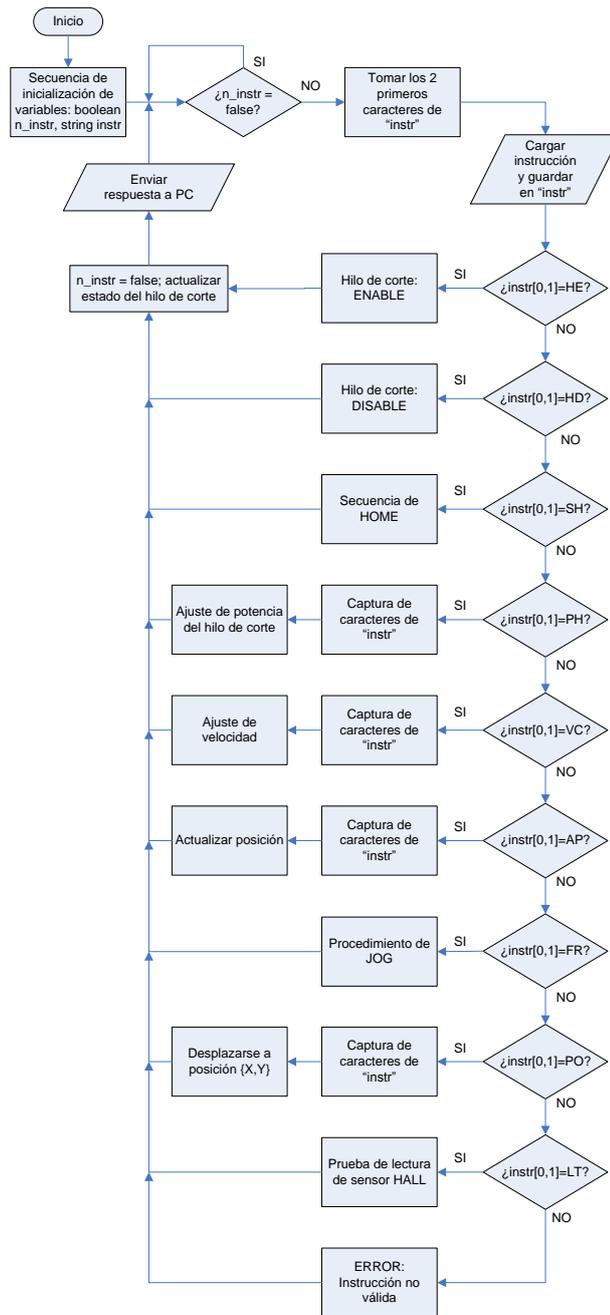
**Comando HE:** es el comando encargado de activar la señal "ENABLE" vista en el circuito de la figura 5.3. Dicha señal es la que controla el encendido del hilo de corte, que consecuentemente está regulado por el circuito de potencia.

**Comando HD:** es la contraparte del comando HE, es decir, se encarga de deshabilitar la señal ENABLE.

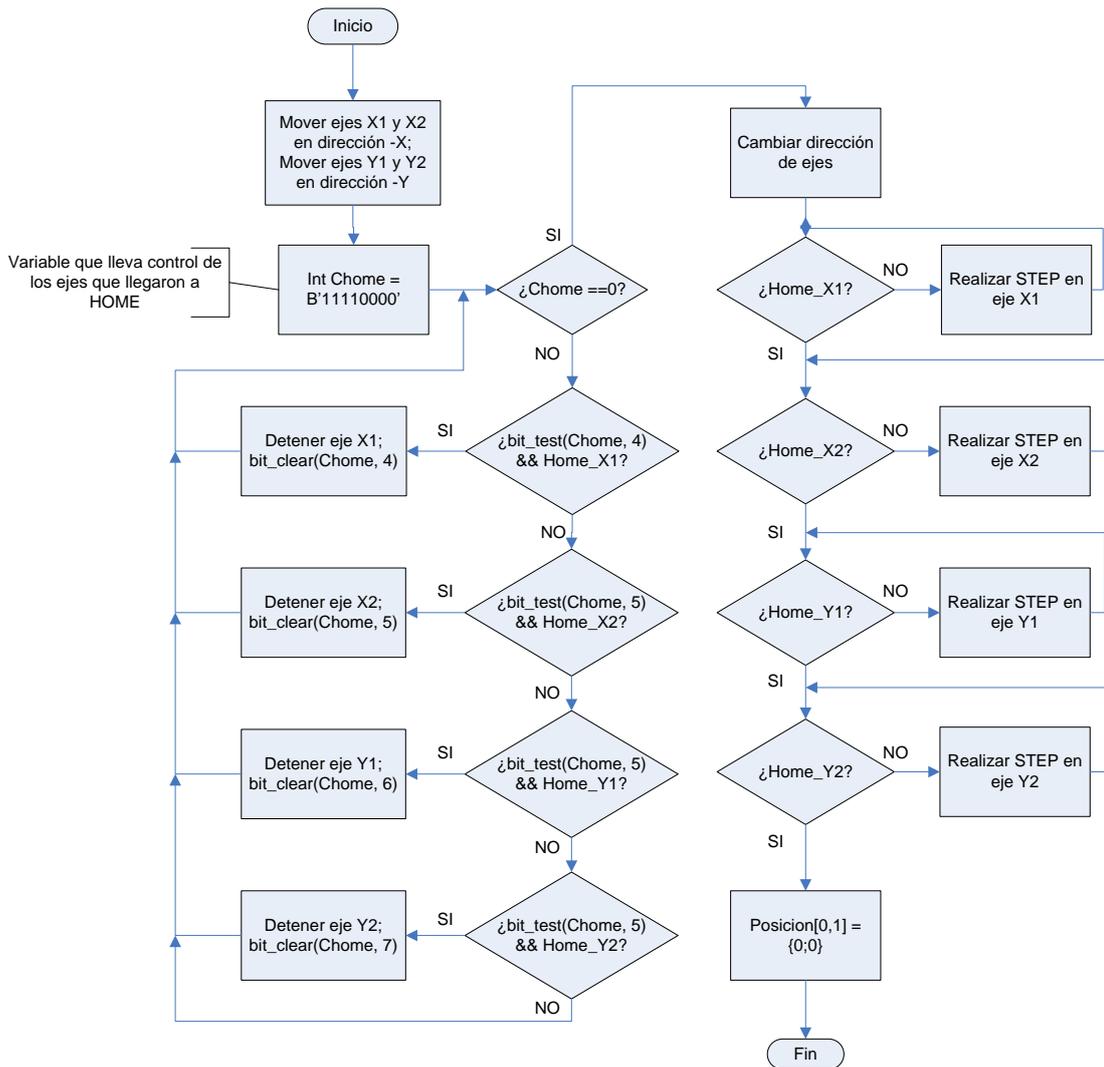
**Comando SH:** con éste comando se ejecuta la secuencia que posiciona a los ejes X1, X2, Y1 y Y2 en HOME, que también es conocido como punto de referencia o punto {0; 0}. Cada vez que se enciende la máquina, el control no tiene idea de dónde está posicionado el hilo de corte, entonces cuando se ejecuta el comando los ejes X1 y X2 se mueven en la dirección  $-X$  mientras que los ejes Y1 y Y2 se mueven en dirección  $-Y$  hasta que el control detecta que en cada eje se activó el microswitch respectivo (ver figura 5.7).

Cuando el microswitch es activado el eje debe detenerse y seguidamente irá dando pasos cada cierto tiempo en la dirección contraria, hasta que el microswitch se desactive. Cuando todos los ejes terminan de ejecutar dicha secuencia se considera que todos los ejes están ubicados en HOME y en éste caso debe estar posicionado como se vio en la figura 3.2. Entonces el hilo deberá estar ubicado en la esquina inferior izquierda de los ejes X y Y pero paralelo al eje Z de la máquina.

**Comando PH:** se encarga de ajustar la potencia suministrada al hilo de corte, para esto el comando incluye como único parámetro un valor entre 0 y 255 donde 0 es la potencia máxima y 255 es la potencia mínima. Dicho parámetro es transferido a un convertidor digital / analógico y éste se encarga de generar el voltaje de control que regula el ancho de pulso del PWM visto en la figura 5.4.



**Figura 5.21** Diagrama de flujo para el programa principal del microcontrolador.



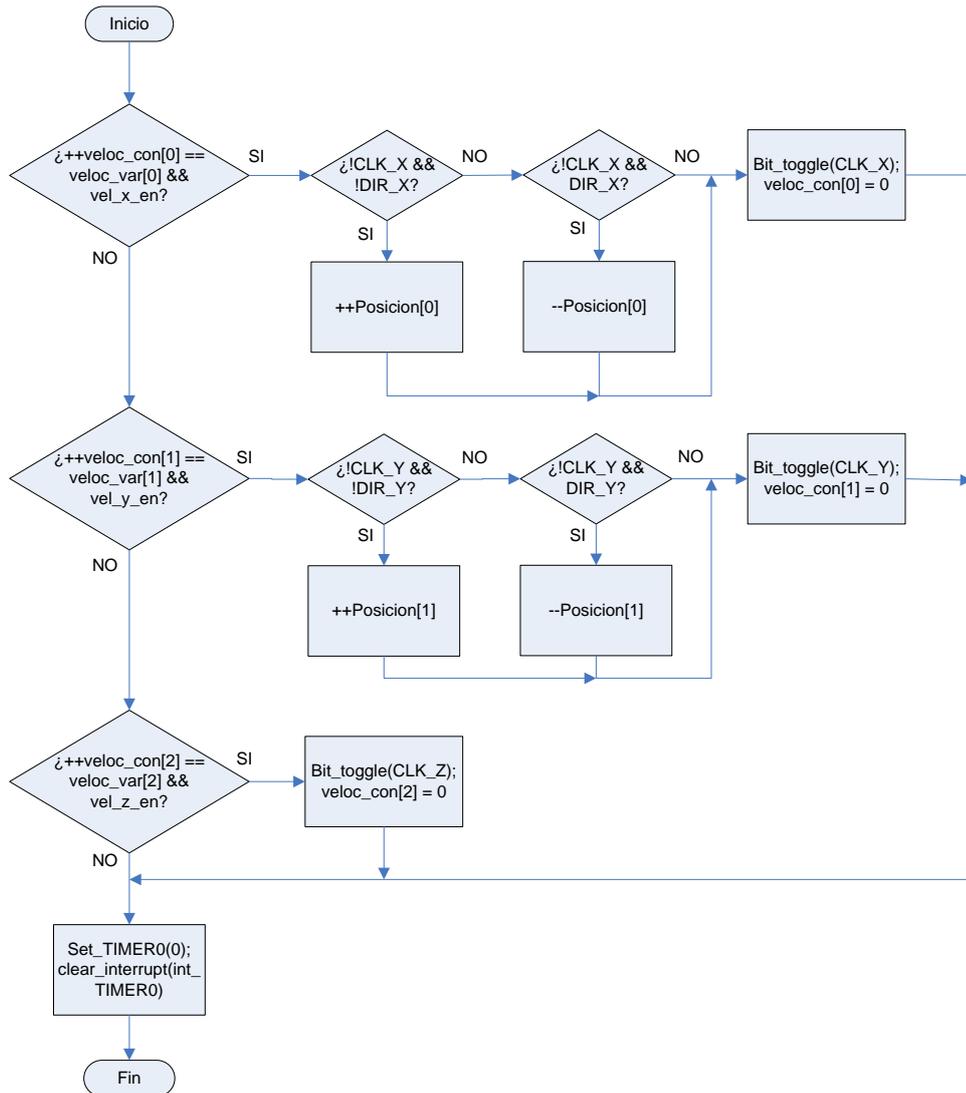
**Figura 5.22** Diagrama de flujo para la secuencia de HOME.

**Comando VC:** es el comando utilizado para ajustar la velocidad de los ejes; incorpora 3 parámetros y cada uno representa un número de 32 bits que modifica la lista de enteros `veloc_var[0, 1, 2]`. En realidad, la velocidad de cada eje es generada por la rutina de interrupción del `TIMER0` (ver figura 5.23) en donde se maneja una variable de conteo “`veloc_con`” y otra de comparación “`veloc_var`”, para cada eje.

Por cada interrupción se aumenta en uno el valor de `veloc_con` y se compara con `veloc_var`, si son iguales se resetea el contador y se cambia el estado de la salida digital que corresponde al `CLOCK` del eje, es decir, pasa de estado bajo a estado alto y viceversa. Entonces, un ajuste de velocidad con éste

comando representa un ajuste en la frecuencia con que conmuta la señal de CLOCK.

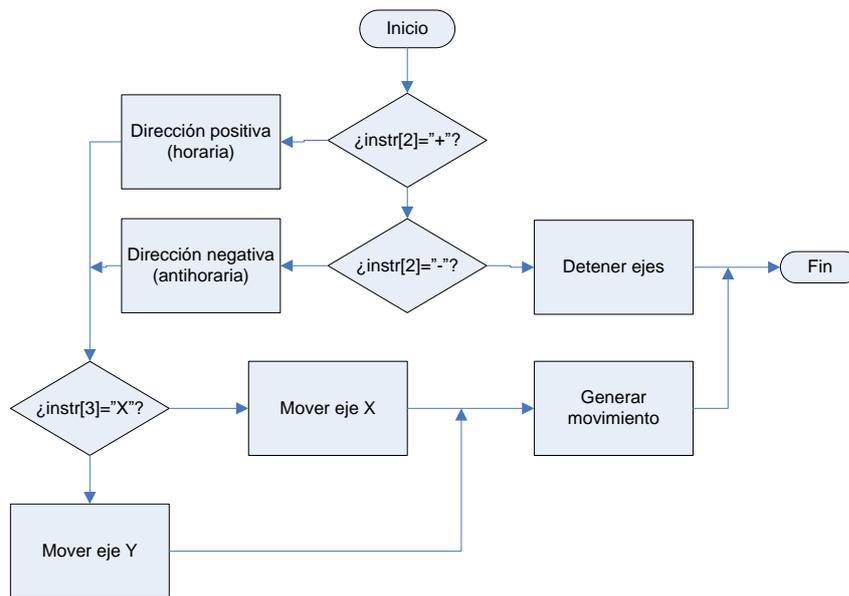
Por cada periodo de la señal de CLOCK, y según el eje junto con el bit DIRECTION se aumenta o se disminuye en uno la variable pos[0,1] que maneja el programa de control para saber la ubicación actual del hilo de corte.



**Figura 5.23** Diagrama de flujo para la interrupción del “TIMER0”.

**Comando AP:** este comando incluye dos parámetros, uno para ajustar el registro de posición en X y el otro para el eje Y, y sirve para ajustar la posición actual del hilo.

**Comando FR:** se utiliza cuando se requiere realizar un movimiento manual de alguno de los ejes (ejemplo: pulsos de JOG). Como parámetros lo compone un tercer caracter entre “+” o “-” que define la dirección de giro, seguido por otro caracter entre “X”, “Y” y “Z” para establecer el eje (o par de ejes) a mover. Desde que el comando fue recibido, el eje se mantendrá en movimiento hasta que se envíe otro comando FR pero con un tercer caracter distinto de “+” o de “-”, para no confundir, se envía el caracter cero “0” para indicar final de movimiento. La figura 5.24 muestra el diagrama de flujo de éste comando.

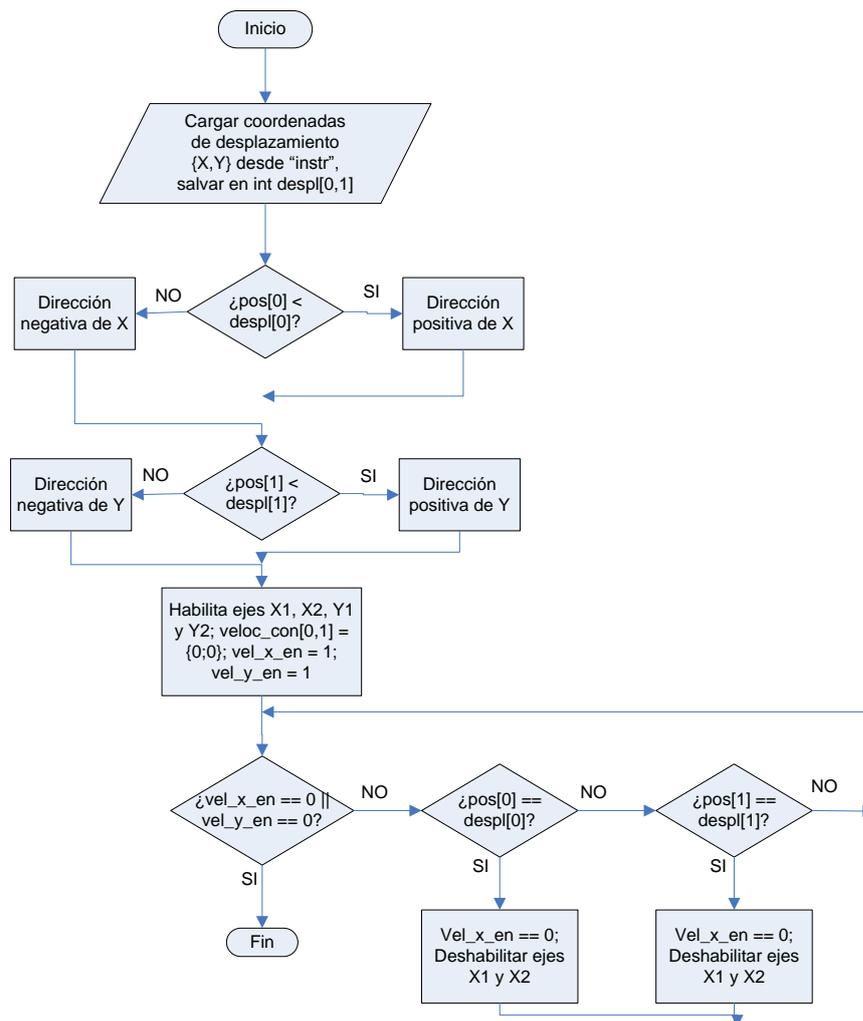


**Figura 5.24** Diagrama de flujo para el comando FR.

**Comando PO:** Este comando es el encargado de mover los ejes X y Y desde la posición actual hacia el punto de destino especificado en las coordenadas del comando (ver figura 5.25). Como parámetros recibe, en este orden, la coordenada en el eje X y la coordenada en el eje Y.

Dichas coordenadas son enviadas en “unidades STEP”, que es la unidad de medida longitudinal a utilizar por el control para cuantificar el desplazamiento; la equivalencia en milímetros de cada “STEP” está sujeta al tipo de motor empleado y la mecánica de movimiento de los ejes, por lo que en el programa CAM se manejará un factor de conversión para determinar cuantos STEPS debe desplazarse cada eje antes de ser enviado en el comando.

**Comando LT:** Este comando es principalmente para depuración, se utilizó para tener noción si el sensor de HALL está obteniendo lecturas, o bien, para determinar la amplitud del ruido producido en el mismo. Lo que hace es tomar muestras del sensor y devuelve como respuesta el valor máximo y el valor mínimo obtenido del muestreo, se toman 5208 porque es el número máximo de muestras que puede tomar el convertidor ADC1 del microcontrolador durante medio periodo de la señal de alimentación (8.33 milisegundos).



**Figura 5.25** Diagrama de flujo para comando PO.

Ahora, los comandos que siguen a continuación los envía el control hacia la PC con el fin de informar el estado del sistema.

**Comando A1:** Indica que el comando fue recibido satisfactoriamente.

**Comando A2:** Indica que el comando se ejecutó sin problema alguno.

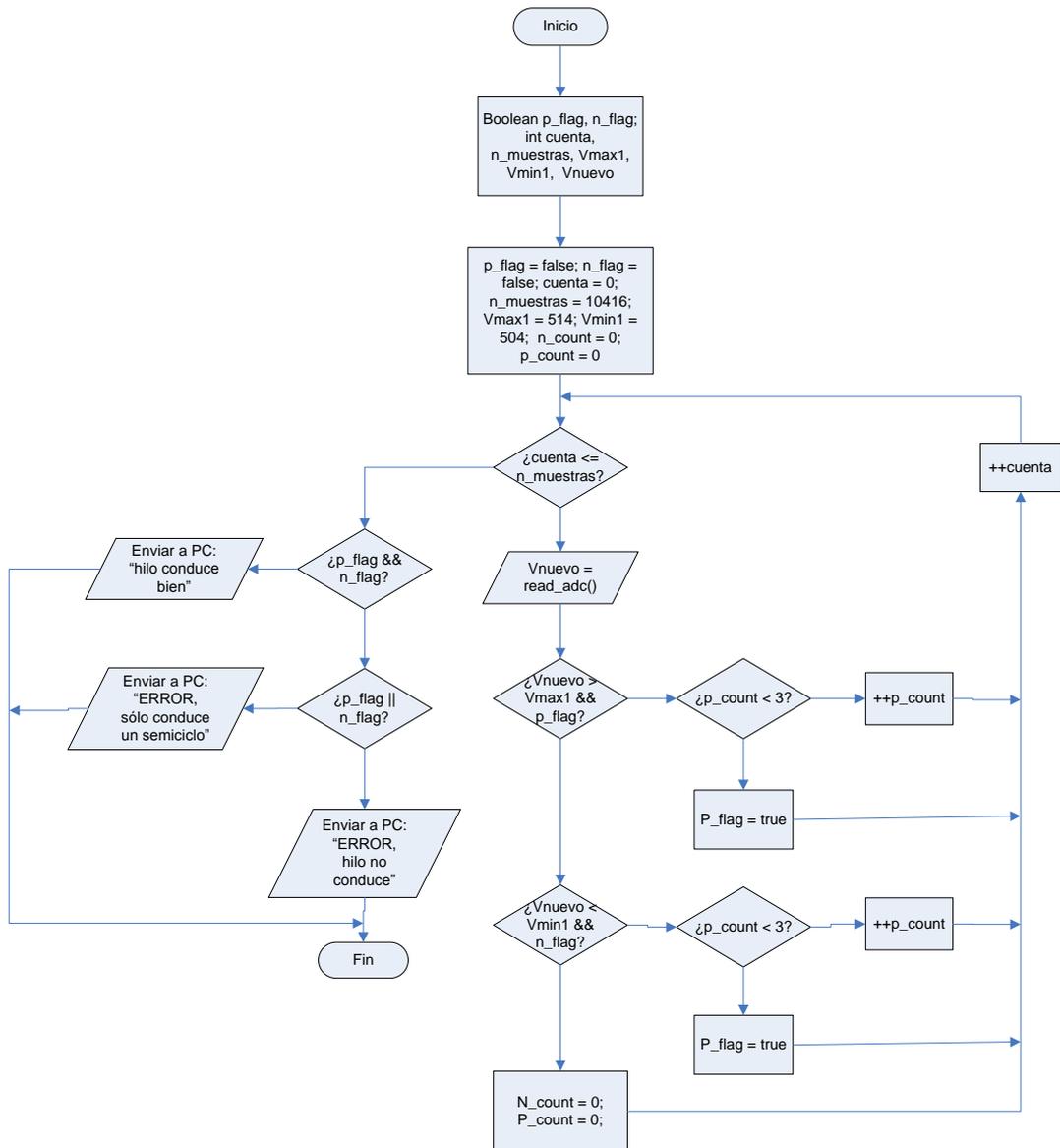
**Comando A3:** Indica que el hilo de corte conduce bien, para determinar esto el control ejecuta el algoritmo de la figura 5.26 cada vez que la PC envía un comando. Para entender el algoritmo hay que aclarar que el sensor de HALL genera una señal con un offset (referencia) de 6 Voltios, y dado que el hilo de corte es alimentado con una señal sinusoidal alterna, la señal obtenida en el sensor es precisamente una señal sinusoidal alterna pero con el offset dado (ver figura 5.27).

Conociendo esto, el algoritmo se planteó de la siguiente forma: se toman 10416 muestras durante un periodo completo de la señal de alimentación, cada muestra se compara con los valores “V\_max” y “V\_min” que representan el rango donde se ubica el offset junto con un margen de error, si se detectan 3 muestras seguidas con valor mayor a V\_max quiere decir que el hilo conduce en el semiciclo positivo y si se detectan 3 muestras seguidas con valor menor a V\_min quiere decir que el hilo conduce en el semiciclo negativo.

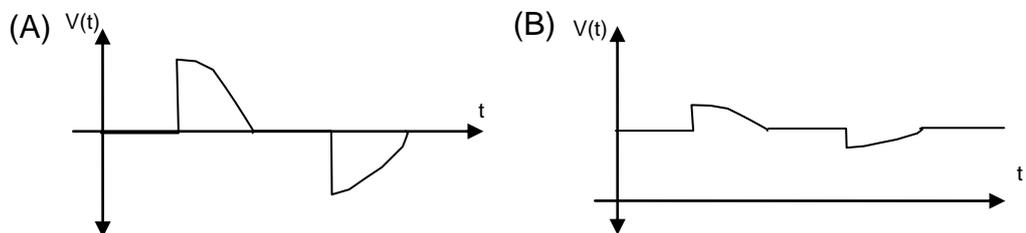
Para determinar si por el hilo está pasando corriente alterna, debe aplicarse la lógica del párrafo anterior con la finalidad de que en un periodo de onda completa haya conducido tanto el semiciclo positivo como el semiciclo negativo. Los demás casos se discutirán en los comandos E2 y E3.

**Comando E1:** Indica error de sintaxis, que puede atribuirse a que la comunicación está siendo corrompida por efectos de ruido, intermitencia, etc. O simplemente que el comando enviado no posee la información correcta.

**Comando E2:** Si tras haberse ejecutado el algoritmo de la figura 5.26 se determina que no hubo conducción en cualquiera de los dos semiciclos, significa que el hilo no conduce. Si en el programa CAM se ordenó que el hilo conduzca (comando HE) y el control devuelve el comando E2, significa que el hilo puede estar roto y automáticamente se desactiva para evitar accidentes; si el hilo es deshabilitado desde el programa CAM éste comando simplemente es ignorado.



**Figura 5.26** Diagrama de flujo para el algoritmo de estado del hilo de corte.



**Figura 5.27** Formas de onda. (A) Señal de alimentación. (B) Señal del sensor.

**Comando E3:** Si tras haberse ejecutado el algoritmo de la figura 5.26 se determina que hubo conducción en sólo uno de los dos semiciclos, significa que la

etapa de rectificación tiene problemas. Tras el envío del comando, no sólo el hilo es desactivado, también se da la alerta de que debe hacer una revisión del hardware para corregir el problema.

Cuando el operario ordene mandar a realizar una figura, el programa de la PC primero revisará que el hilo de corte esté encendido, y empezando desde HOME se transmitirá el comando VC seguido por el comando PO para ir desplazando el hilo de corte a través de los puntos de la figura.

## Capítulo 6: Análisis de resultados

### 6.1 Resultados

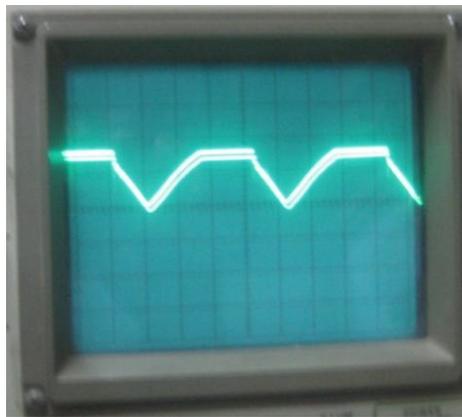
Antes de ser incorporado propiamente en el prototipo de la máquina CNC, el circuito que controla la potencia del hilo de corte fue probado por aparte para verificar que el funcionamiento del mismo fuera acorde a lo planteado teóricamente en el diseño, o bien, que no presentara fallas que eventualmente representara un problema en la seguridad del usuario. Para esto se realizó una valoración por segmentos.

Primero, que verificó que las señales de salida en cada etapa del circuito fueran las esperadas, se enumera cada caso:

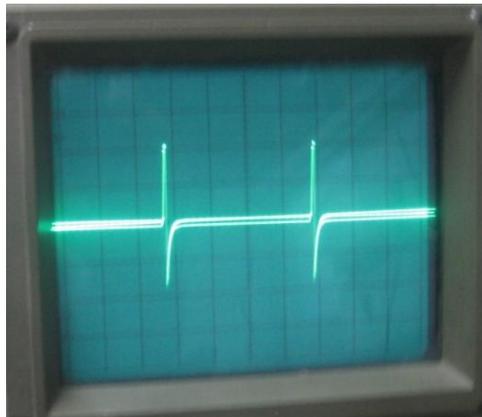
- A. Cada regulador que alimenta los componentes del circuito debe suministrar la tensión eléctrica esperada: +5Vcd a la salida del regulador LM7805, +12Vcd a la salida del regulador LM7812, y -12Vcd a la salida del regulador LM7912.
- B. En la salida del rectificador, que también es la entrada del detector de cruce por cero se espera una señal sinusoidal con rectificación de onda completa, frecuencia de 120Hz y una tensión pico de +10V.
- C. La señal a la salida del detector de cruce por cero debe ser una señal pulsante con un ciclo de trabajo menor al 5% en el caso de tener la señal ENABLE habilitada, en caso contrario no deben haber pulsos.
- D. La señal en la salida en el integrador debe ser una señal “diente de sierra”.
- E. La señal en la salida del comparador debe ser una señal pulsante cuyo ciclo de trabajo varía cuando el voltaje de control es variado en igual proporción.
- F. En la salida del temporizador 555 debe obtenerse una señal pulsante de 20kHz durante el tiempo en que el ciclo en alto de las señal anterior esté activa, en caso contrario mantiene la salida en cero voltios.

G. Finalmente, la señal anterior debe repetirse en el secundario del transformador de pulsos.

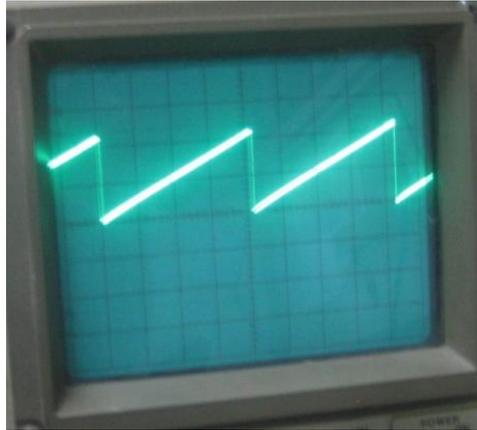
Durante la prueba, la señal ENABLE se mantuvo activa, y la tensión eléctrica de control fue simulada con un divisor de tensión graduado por potenciómetro. En ésta parte los SCR en conexión antiparalelo fueron aislados y de momento no estuvieron conectados con el circuito de control. Las mediciones fueron hechas por medio de un osciloscopio. Las siguientes imágenes muestran las señales obtenidas en el osciloscopio para cada etapa del circuito.



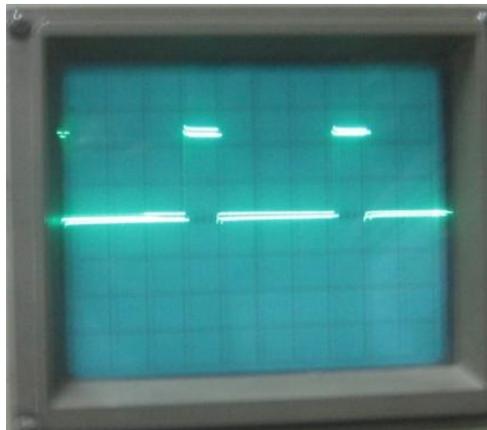
**Figura 6.1** Forma de onda del rectificador de onda completa.



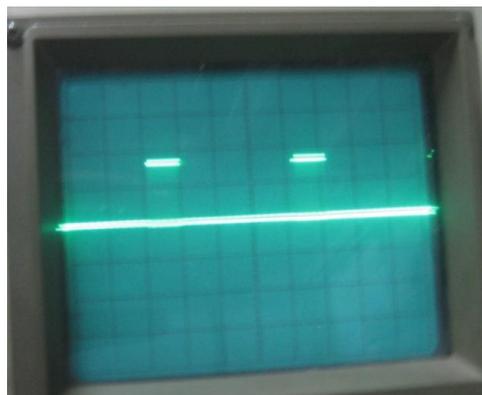
**Figura 6.2** Forma de onda del detector de cruce por cero.



**Figura 6.3** Forma de onda del integrador



**Figura 6.4** Forma de onda del generador PWM.



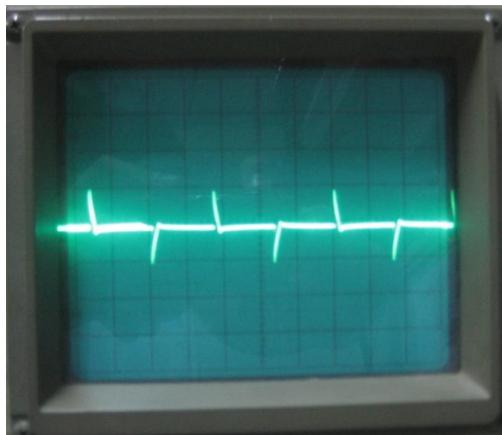
**Figura 6.5** Forma de onda de la señal pulsante en la salida del temporizador.

Tras obtener el comportamiento esperado en cada etapa del circuito, se procedió entonces a conectar los SCR y se hicieron pruebas, primero con carga resistiva (dos bombillos conectados en serie) y después ya propiamente con el

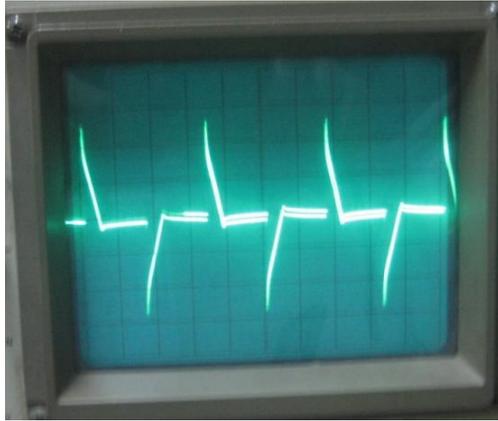
transformador con carga resistiva conectada en el secundario. En ésta prueba se utilizó un transformador con relación de vueltas 240:32 y una potencia aparente de 1KVA, la resistencia de carga utilizada fueron tres resistencias de  $10\Omega$ , 300W conectadas en paralelo, la resistencia equivalente fue medida con un multímetro y se obtuvo que su valor fue de  $3.2\Omega(+/-0.1\Omega)$ . Se utilizó la tensión de la red de alimentación (240V, 60Hz) para alimentar tanto el primario del transformador con los SCR en antiparalelo, como también el circuito de control.

En la prueba con transformador se midió con el osciloscopio la señal obtenida en el primario del transformador, las figuras 6.6 y 6.7 muestran dicha señal con el ajuste del control al mínimo y al 20% del rango de ajuste.

También se probó activando y desactivando la señal ENABLE unas 20 veces para verificar que el cambio de estado de “no conducción” en los SCR al estado de “conducción controlada” se realice de forma segura, encontrando que no se presenta problema alguno.



**Figura 6.6** Forma de onda en el primario del transformador con el ciclo de trabajo al mínimo.



**Figura 6.7** Forma de onda en el primario del transformador al 20% de su capacidad.

Adicionalmente, se realizaron mediciones donde se varió el voltaje de control y se midió la tensión RMS en el primario (mediante un multímetro) y la corriente RMS en el secundario (con un amperímetro de gancho). Las mediciones hechas se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 6.1** Mediciones hechas en el circuito de control de potencia.

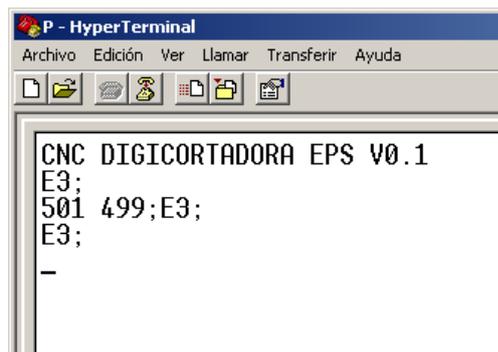
$V_{\text{CONTROL}} (+/-0.01V)$	$V_{\text{Primario RMS}} (+/- 0.1V)$	$I_{\text{Secundario RMS}} (+/-0.01A)$
10.05	10.4	0.51
8.20	52.3	3.41
6.17	119.5	7.40
4.12	183.8	9.76

Para determinar el establecimiento de la comunicación entre la PC y el microcontrolador por medio del puente USB-UART, primero se programó el microcontrolador basado en los algoritmos descritos en la sección 5.3.4; adicionalmente se programó que cada vez que se encendiera el microcontrolador, éste transmitiera en caracteres ASCII la leyenda “CNC DIGICORTADORA EPS V0.1” con el fin de verificar que el microcontrolador estaba en capacidad de transmitir sin problema alguno. Una vez instalados los drivers para el manejo del puente USB-UART en la PC, se realizaron pruebas de comunicación con el programa “HyperTerminal”. En él, se establecieron los parámetros de comunicación y se verificó que:

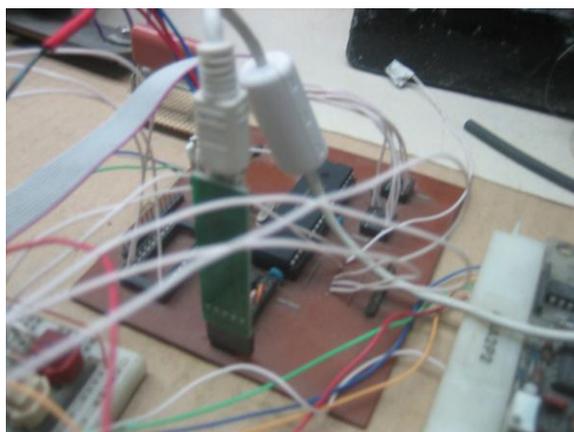
- A. Cada vez que se alimentaba el microcontrolador, se recibiera en la PC la leyenda “CNC DIGICORTADORA EPS V0.1”.

- B. Cuando se le transmitían comandos al control en forma manual, es decir, tecleadas por el usuario, el control respondiera con alguno de los comandos de respuesta implementados.
- C. Una vez que el control recibía el comando y mandaba su respuesta, inmediatamente el control acataba la orden designada por el comando enviado.

Por ejemplo, si el usuario enviaba el comando “HE;”, el control respondía con “A1;” seguido de “A2;” y habilitaba la salida RA1 del PIC16F877, que es la encargada de habilitar el control del hilo de corte. La siguiente figura muestra un ejemplo del uso del programa “HyperTerminal” para recibir los datos provenientes del microcontrolador.



**Figura 6.8** Prueba de comunicación PC-Control.



**Figura 6.9** Microcontrolador junto con puente USB-UART.

Eventualmente, con la verificación del funcionamiento en el microcontrolador, se incorporaron los comandos a la lógica del programa de computadora, la prueba del funcionamiento se realizó principalmente en la pantalla de control manual. Se verificó entonces que tanto la PC como el control estaban en su capacidad de transferir datos e instrucciones.

En la prueba con los motores paso-a-paso, se conectaron a los drivers siguiendo la configuración descrita en secciones pasadas. Primero se probó el movimiento de los motores mediante el ajuste manual de las señales CLOCK (simulado con un botón), DIRECTION y ENABLE, y después propiamente con las señales que genera el microcontrolador. Se valoró que el motor girara en forma apropiada (es decir, que la secuencia de fases se cumpliera en el orden correcto). También se evaluó el torque en el motor, como no existía todavía un criterio técnico que permitiera cuantificar el torque necesario, de momento se realizó un juicio de valor: estando el motor en movimiento se intentó frenar mecánicamente, de ésta forma si el motor resistía el torque de frenado era un buen indicador.

En cuanto a la velocidad del motor se logró determinar la velocidad máxima a la que puede moverse el motor a partir de la frecuencia que genera la señal CLOCK: 625 STEPS por segundo. Dicha velocidad se estimó con base en el algoritmo del TIMER0 incorporado en el microcontrolador, el temporizador tarda 0.1ms en llegar al "overflow", y dado que la máxima velocidad se da cuando el valor del parámetro "veloc\_var" es ajustado en 16, la señal CLOCK tendría un periodo igual a 1.6ms, lo cual equivale a 625 STEPS por segundo. Si se intenta mover a una velocidad mayor a 625 STEPS por segundo, las fases del motor cuentan con el tiempo necesario para reaccionar y generar el desplazamiento de fase, por lo que simplemente no se mueve.



**Figura 6.10** Motor con su respectivo driver.

Ya propiamente los motores, en conjunto con el microcontrolador, se midió la precisión en el desplazamiento de los motores, para eso se determinó primero cuantos STEPS eran necesarios para dar una vuelta completa al rotor. El motor utilizado para la prueba giraba 7.5 grados por cada STEP, lo cual representa que para dar una vuelta entera el motor debe recibir 48 STEPS (o bien, 48 pulsos de la señal CLOCK). La prueba consistía en poner una “marca” o referencia y mover el motor la cantidad de STEPS equivalente a una vuelta entera, empleando para ello el comando “PO”; si el rotor se detenía justo en la marca asignada, el motor se movió la cantidad de STEPS adecuada, en caso contrario se realizaron los ajustes necesarios en el programa, de manera que la prueba se cumpliera de forma satisfactoria.



**Figura 6.11** Marca de referencia utilizada para medir el desplazamiento

Durante las pruebas con los motores, se observó que éstos tienden a calentarse, y esto es un indicador de que los motores tienden a disipar potencia innecesaria mientras se encuentran en movimiento, aún cuando la configuración del driver esté ajustado a los valores nominales del motor.

En la sección 5.3.2 se había mencionado sobre algunas pruebas que se habían hecho para verificar el funcionamiento del algoritmo de mejor ruta con diferentes tipos de figuras (ver figura 5.18), luego se incorporó el bucle que envía los datos al control para probar que los motores se mueven de acuerdo a la ruta especificada por el algoritmo y de ésta manera probar todos los elementos en conjunto. La última prueba realizada involucra que se haya cumplido previamente los siguientes pasos:

- A. Haber encendido y ajustado la potencia del hilo de corte (simulado con las resistencias utilizadas en la sección 6.1.1) por medio de la pantalla de control manual, la conducción en la carga debía ser detectada por el sensor de HALL para que el sistema no determinara ningún tipo de fallo.
- B. Haber ajustado la velocidad de corte mediante la pantalla de control manual.
- C. Haber corrido la secuencia de HOME.
- D. Haber abierto un archivo HPGL con la figura a cortar y se hayan ejecutado los algoritmos de mejor ruta (se ordena en el programa mediante el botón “Simulación”).

Entonces se le ordenó al programa ejecutar el proceso “Corte”, donde se le transmiten las coordenadas de movimiento al control para generar el movimiento de los motores, y con el hilo encendido se corta la figura deseada. En la prueba no interesó medir la cantidad de desplazamiento de los motores ya que eso quedó determinado en la prueba de la sección pasada, lo que se quiso determinar con la prueba fue que la secuencia de movimiento de los motores fuese acorde a los datos de la figura a cortar; además, con los desplazamientos diagonales que involucran el movimiento de ambos ejes se debía verificar que

independientemente de las velocidades de cada eje ambos se tenían que detener AL MISMO TIEMPO, de esta forma se comprobaba que el cálculo de las componentes de velocidad es determinado correctamente.

Se probó entonces con la figura de un cuadrado de 30mm por 30mm, se pudo observar que primero ambos ejes se movieron de manera que el desplazamiento era desde el punto inicial hacia el punto más cercano de la figura, es decir, una de las esquinas del cuadrado; después se movió únicamente el eje Y con dirección horaria, la cual se toma como la dirección positiva de dicho eje. Una vez alcanzado el destino, el eje Y se detuvo y seguidamente se movió el eje X con dirección horaria; y así sucesivamente: se movió el eje Y con dirección en sentido antihorario y finalmente el eje X con dirección en sentido antihorario, donde los ejes se detuvieron y el programa mostró la leyenda “Proceso terminado”, con lo que se daba por finalizada la secuencia.

Adicionalmente, se hicieron pruebas con los archivos que guardaban la información de los contornos que se muestran en la figura 5.18, analizando el movimiento en cada caso, y se observó que efectivamente el movimiento de los ejes está determinado por la información contenida en el archivo de prueba.

## **6.2 Análisis de resultados**

Las pruebas realizadas en la sección anterior ayudaron a determinar que la solución obtenida integra el control de los motores paso-a-paso, donde la configuración de los drivers es crucial para adaptar los mismos a las características nominales del motor y las señales de control generadas por el microcontrolador permiten el desplazamiento preciso a la velocidad indicada por el usuario.

Sin embargo, se determinó que los motores tienden a disipar mucha potencia en forma de calor, aún cuando las condiciones de operación son las especificadas por el fabricante. Cuando se acoplen los motores a la estructura se recomienda incorporar también elementos como disipadores de calor o ventiladores como medida de seguridad para prevenir un posible sobrecalentamiento que pueda dañar los bobinados del motor.

La solución obtenida también integra los elementos necesarios para controlar la potencia de calentamiento, el diseño se basa en las restricciones de diseño e incorpora los elementos teóricos determinados en las secciones 3.2.2, 3.3.1 y 5.1.4, de donde se pudo determinar que el intervalo de diámetros de hilo a utilizar con el control es entre 0.4547mm y 0.1600mm y el intervalo de temperatura se encuentra entre 200°C y 450°C.

Si bien, las pruebas fueron hechas con resistencias y no propiamente con el hilo de Nicromo, se pudo comprobar que el método de control utilizado permite un ajuste del ciclo de trabajo junto con las pruebas que respaldan que dicho diseño no representa un riesgo de seguridad a nivel eléctrico. El hilo de Nicromo es modelado como una resistencia, lo cual no representaría mayor diferencia y, eventualmente, se pueden aplicar las ecuaciones 3.4 y 3.5 para estimar la resistencia equivalente del hilo a utilizar.

La solución propuesta incorpora la comunicación por medio de puerto USB, y se realizaron las pruebas que determinaron que el control entiende las instrucciones transferidas desde la computadora, aplicando el protocolo de comunicación implementado. El microcontrolador puede entender los comandos que se le envían y ejecuta las instrucciones que recibe.

El programa de computadora permite abrir archivos con formato HPGL y realiza una interpretación de la información obtenida para determinar la ruta a seguir por los ejes, también para convertir las instrucciones dadas por el operario en comandos que entiende el módulo de control. El usuario puede tener interacción con la máquina mediante la interfaz gráfica de la pantalla "Control Manual".

Finalmente, se probaron todos los elementos en conjunto, y con las pruebas hechas se puede concluir que la solución implementada está lista para ser probada con la estructura a utilizar en el proceso.

Durante el desarrollo del proyecto se concluyó que algunos parámetros no pudieron ser determinados de forma teórica, tal es el caso de la curva velocidad

de corte en función de la potencia de calentamiento, o bien, el torque requerido para mover los ejes de la estructura. Las pruebas experimentales que validen dichos parámetros serán realizadas cuando se cuente con la estructura requerida para el desarrollo de las pruebas requeridas.

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- A. El módulo de control de la potencia del hilo fue diseñado para operar con hilos con diámetro entre 0.4547mm y 0.1600mm y temperaturas de corte entre los 200°C y los 450°C.
- B. El módulo que controla la potencia del hilo de corte permite ajustar el ciclo de trabajo de la señal de alimentación y la activación del mismo por orden el usuario.
- C. Los motores paso-a-paso junto con sus respectivos drivers fueron probados en vacío, configurando el control de la corriente de alimentación según las características nominales.
- D. El protocolo de comunicación PC-Control permite la transferencia e interpretación de instrucciones ordenadas por usuario, utilizando como medio de transferencia un puerto USB.
- E. El programa de computadora permite abrir archivos HPGL e interpreta la información contenida en los mismos para generar el algoritmo de ruta de corte optimizado.
- F. El programa de computadora incluye la pantalla de “Control Manual”, donde el usuario puede aplicar los comandos de control implementados.
- G. El funcionamiento de todos los elementos en conjunto fue validado, determinando entonces que la parte electrónica de la solución fue implementada.
- H. Se deben realizar pruebas experimentales con los elementos de control acoplados a una estructura diseñada específicamente para su uso, y con su análisis se puedan justificar las velocidades de corte en función de la potencia de calentamiento y el torque requerido para el movimiento de los ejes.

## 7.2 Recomendaciones

- A. Para mejorar la precisión en el movimiento de los ejes, probar utilizando motores paso-a-paso de resolución igual o inferior a 1.8 grados por paso, adicionalmente se sugiere utilizar tornillos sin fin para el desplazamiento del eje.
- B. En la puesta en marcha con la estructura, incorporar elementos para evacuar el calor producido por los motores paso-a-paso.
- C. Con base en mediciones experimentales, crear una gráfica de velocidad de corte en función de la potencia de calentamiento, de manera que ésta le sirva como referencia al usuario.

## Capítulo 8: Bibliografía

- [1] Megaplot. **Megaplot Foam Cutters**. Catálogo. Versión 2009. Polonia. Megaplot.
- [2] Wikipedia. **Polystyrene** [En línea] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>> [Consulta: 20/02/10].
- [3] Solid Solutions. **Technical Datasheet Styrofoam SM** [En línea] <[http://www.solidsolutions.com.au/datasheets/tds\\_fs\\_blue\\_styrofoam\\_sheeting.pdf](http://www.solidsolutions.com.au/datasheets/tds_fs_blue_styrofoam_sheeting.pdf)> [Consulta: 24/03/10].
- [4] KNAUF Miret. **Características del Poliéstireno Expandido KNAUF Therm TH35SE** [En línea] <<http://www.davsa.com/infoWeb%5CGrup%5CSubgrups%5Ccaracteristiques%5C040101D-20.pdf>> [Consulta: 20/02/10].
- [5] Mark, James E. **Physical properties of polymers handbook**. 2da ed. Nueva York: Springer, 2006.
- [6] D. G. Ahn, S. H. Lee and D. Y. Yang. **Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 42, Issue 4, March 2003, Pages 1447-1464.
- [7] Wikipedia. **Nichrome** [En línea] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome>> [Consulta: 26/02/10].
- [8] American Society of Metals. **Metals Handbook** USA: Carnes Publications Services, Inc. 1985.
- [9] Wiretronic, Inc. **Nichrome (tm) & Other Resistance Alloys –Tech Data-** [En línea] <<http://www.wiretron.com/nicrdat.html>> [Consulta: 26/02/10].
- [10] Electric Heating Assoc. **Current temperature characteristics of Nichrome 60 straight wire** [En línea] <<http://www.heatersplus.com/wire.htm>> [Consulta: 26/02/10].
- [11] Chapra, Steven y Canale, Raymond. **Metodos Numericos para Ingenieros**. Quinta edicion. Estados Unidos: Editorial McGraw Hill. 2006.
- [12] Laidman, Rustle. **Stepper Motors and Control** [En línea] <<http://www.stepperworld.com/Tutorials/pgUnipolarTutorial.htm>> [Consulta: 16/10/10].
- [13] Bodine Electric Company. **User's Manual THD-1801B 5 Amp Step Motor Translator**. Manual. USA: Bodine Electric Company.
- [14] Allegro Microsystems. **SLA7024M, SLA7026M AND SLA7029M**. Hoja de datos. USA: Allegro Microsystems. 1994.
- [15] Anónimo. **HPGL – Hewlett Packard Graphics Language** [En línea] <<http://www.sxlist.com/techref/language/hppl.htm>> [Consulta: 26/03/10].
- [16] Sun Microsystems. **How to use File Choosers** [En línea] <<http://java.sun.com/docs/books/tutorial/uiswing/components/filechooser.html>> [Consulta: 31/03/10].
- [17] ChuWiki. **Lectura y Escritura de Ficheros con BufferedReader** [En línea] <[http://www.chuidiang.com/chuwiki/index.php?title=Lectura\\_y\\_Escritura\\_de\\_Ficheros\\_en\\_Java](http://www.chuidiang.com/chuwiki/index.php?title=Lectura_y_Escritura_de_Ficheros_en_Java)> [Consulta: 31/03/10].

- [18] Franco García, Angel. **Las clases para el manejo de Strings** [En línea] <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cursoJava/fundamentos/clases1/string.htm>> [Consulta: 31/03/10].
- [19] Sun Microsystems. **Lesson: Getting Started with Graphics** [En línea] <<http://java.sun.com/docs/books/tutorial/2d/basic2d/index.html>> [Consulta: 31/03/10].
- [20] Autodesk. **ASCII DXF File Format: General File Structure** [En línea] <[http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/general\\_file\\_structure\\_al\\_u05\\_b.htm](http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/general_file_structure_al_u05_b.htm)> [Consulta: 12/04/10].
- [21] USB Implementers Forum, Inc. **USB Frequently Asked Questions, Cables and Long-Haul solutions** [En línea] <<http://www.usb.org/developers/usbfaq#cab3>> [Consulta: 15/04/10].
- [22] National Fire Protection Association. **NFPA 70: National Electrical Code USA: NFPA. 2005.**
- [23] Microchip. **PIC16F87X Datasheet** [En línea] <<http://www.microchip.com>> [Consulta: 15/04/10].
- [24] International Rectifier. **ST230C12C1 Datasheet** [En línea] <<http://www.irf.com>> [Consulta: 15/04/10].

## Apéndices

### Apéndice A.1 Glosario, Abreviaturas y Simbología.

- CAD: Siglas en inglés de “Diseño Asistido por Computadora” (Computed Aided Design). Comprende todas aquellas herramientas computacionales usadas por Ingenieros y Arquitectos, y que son enfocadas al diseño de productos.
- CAM: Siglas en inglés de “Fabricación Asistida por Computadora” (Computed Aided Manufacturing). Son las herramientas computacionales que aplican la información de herramientas CAD para la planificación, mecanización y manufactura de productos.
- CNC: Siglas de “Control Numérico Computarizado”. Describe los dispositivos capaces de posicionar un elemento (ej: brazo robótico) a partir de información numérica, de forma automática y en tiempo real.
- Coeficiente de expansión térmica: coeficiente que mide el cambio relativo de longitud o volumen de un cuerpo cuando éste experimenta un cambio en su temperatura.
- Driver: Significado en inglés de “Controlador”. Dispositivo electrónico utilizado para el manejo de motores.
- EPS: Siglas en inglés de “Poliestireno Expandido” (Expanded Polystyrene). Polímero empleado en el proceso como materia prima para la elaboración de diversos productos (envases, esquineros, etc.).
- Espacio de corte: Suponiendo un eje coordenado tridimensional donde el eje Z es a lo largo del hilo de corte y el eje Y es paralelo a la dirección de corte, el espacio de corte es la longitud que mide el espacio de material sublimado a lo largo del eje X.

- GUI: Siglas en inglés de “Interfaz Gráfica de Usuario” (Graphical User Interface). Se refiere al uso de elementos gráficos visibles en pantalla para representar información y acciones a ejecutar.
- Hilo de Corte: alambre muy fino de forma cilíndrica, hecho con algún metal. Se le aplica intensidad de corriente eléctrica para calentarlo a una temperatura determinada, y luego es desplazado por en medio de un material para sublimarlo (ver *sublimación*) y así realizar un “corte” sobre el mismo.
- HOME: Significado en inglés de Casa u Hogar, en maquinaria se utiliza éste término para indicar la posición inicial o punto (0,0) de un elemento mecánico que se desplaza por uno o varios ejes (ej: motor, brazo robótico, etc.).
- HPGL: Siglas de “Hewlett-Packard Graphics Language”, formato de archivo creado inicialmente para el control de la impresora HP 7475A, en la actualidad sigue siendo empleado por programas tipo CAD para la representación de figuras y planos.
- Incertidumbre de corte: Longitud tomada desde el punto medio del espacio de corte hasta el punto exacto donde debe cortar según la figura del archivo CAD en escala 1:1.
- JAVA: Lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Sun Microsystems. Es un lenguaje de licencia pública general, lo que significa que es software libre.
- Motor paso-a-paso: dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares.
- Nicromo: Nombre empleado para denominar a todas aquellas aleaciones que se componen en gran parte de Níquel y Cromo, en algunos casos con adición en pequeñas cantidades de otros elementos como Hierro,

Manganeso o Silicio. Dos aleaciones conocidas son el Nicromo A (80%Ni, 20%Cr) y el Nicromo C (60%Ni, 16%Cr, 24%Fe).

- Plt: Extensión de archivo de formato HPGL. Ver *HPGL*.
- PWM: Siglas en inglés de “Modulación por ancho de pulso” (Pulse Width Modulation). Técnica en la cual se varía el ciclo de trabajo de una señal cuadrada para controlar la energía con la que se alimenta una carga.
- STEP: Significado en inglés de “paso”. Es la unidad de medida utilizada para cuantificar el desplazamiento angular en un motor paso-a-paso.
- Sublimación: es la transición de un cuerpo en estado sólido al estado gaseoso.
- USB: Siglas de “Universal Serial Bus”. Puerto de comunicación implementado para la conexión de dispositivos periféricos a una computadora.

## Apéndice A.2 Cálculos de las protecciones di/dt y dV/dt para el SCR ST230C16C0.

Primero se obtuvieron algunas constantes de la hoja de datos para la realización de los cálculos:

$$\begin{aligned} I_{T(AV)} &= 410A \\ \frac{di}{dt} &= 1000A/\mu s \\ \frac{dV}{dt} &= 500V/\mu s \end{aligned} \quad (A.2.1)$$

$I_{T(AV)}$ : Máxima corriente promedio en conducción directa.

También se obtiene otro dato basado en el diseño, los SCR regularán una señal proveniente de una red de alimentación de  $240V_{RMS}$ , 60Hz. Con estos datos se determina el valor mínimo de la inductancia en serie con el SCR para regular el di/dt.

$$L = \frac{\sqrt{2} * 240V}{di/dt} = 340nH \quad (A.2.2)$$

Como los SCR están conectados en serie con el primario de un transformador y la inductancia requerida posee un valor muy pequeño, la inductancia del bobinado primario será suficiente para cumplir con éste valor.

Para el cálculo de la red snubber que servirá como protección dV/dt primero se determinó el valor de la resistencia:

$$\begin{aligned} I_{Descarga} &= \frac{I_{T(AV)}}{4} \\ R_s &= \frac{\sqrt{2} * 240V}{I_{Descarga}} = 3.31\Omega \end{aligned} \quad (A.2.3)$$

Siguiendo con el cálculo del capacitor, se requirió estimar la resistencia de carga que en realidad corresponde a la resistencia del hilo de corte. Como el diseño busca adaptarse al uso de hilos de diferentes longitudes y diámetros, se

aplicaron los mismos criterios de diseño de la sección 5.1.4 para los hilos de corte y se determinó que la resistencia de carga puede variar entre  $18,3\Omega$  y  $187\Omega$ . Dicho rango es la resistencia vista desde el secundario del transformador, para obtener el rango visto desde el primario se determinó la relación de transformación con base en las características de diseño del transformador.

$$a^2 = \left( \frac{V_{\text{Primario}}}{V_{\text{Secundario}}} \right)^2 = \left( \frac{240V}{120V} \right)^2 = 4 \quad (\text{A.2.4})$$

$$R_{\text{Primario}} = R_{\text{Secundario}} * a^2 = R_{\text{Secundario}} * 4$$

De esta manera, se obtiene que el rango de resistencias de carga visto desde el primario abarque entre los  $73,2\Omega$  hasta los  $748\Omega$ . Para efectos de diseño de la red Snubber sólo interesa el valor mínimo ( $73,2\Omega$ ) porque a mayor resistencia de carga, menor será la capacitancia requerida. Se aplica entonces la siguiente fórmula.

$$C_s = 0.632 * \left( \frac{\sqrt{2} * V * R}{dV/dt * (R_s + R)^2} \right) = 5.37nF \quad (\text{A.2.5})$$

Finalmente, la potencia requerida para la resistencia de la red Snubber es:

$$P_s = \frac{1}{2} C * V_p^2 * f_s = \frac{5.37nF * (\sqrt{2} * 240V)^2 * 60Hz}{2} = 18mW \quad (\text{A.2.6})$$

# Anexos

## Anexo B.1 Driver THD-1801B

### DESCRIPTION

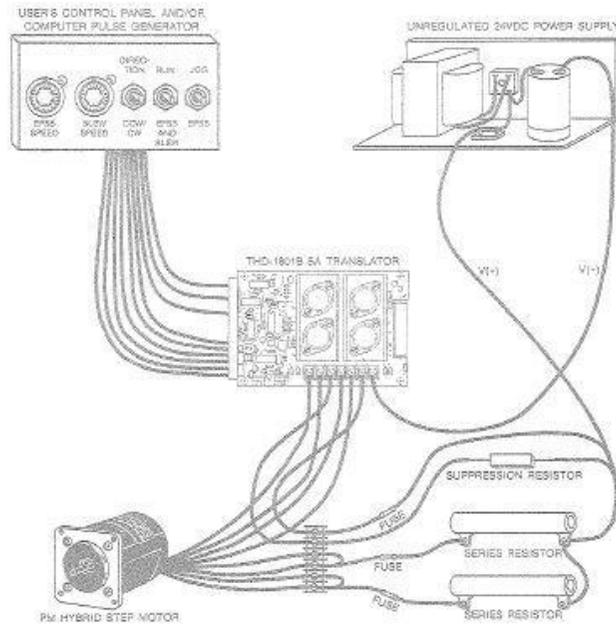


Fig. 1. A Typical Stepper System Set-Up

The THD-1801B is a printed circuit board (4" x 6.3") step motor translator which has been designed to operate with an inexpensive 24VDC unregulated power supply. A regulated power supply can also be used. Maximum output voltage is limited to 40VDC. To provide the user with as much flexibility as possible, the THD-1801B has an internal pulse generator with JOG and RUN modes, bi-direction control capability, drive inhibit function, full and half-step capability and the ability to be operated by either 5V TTL or 12V CMOS command signals. The internal pulse generator can produce EFSS pulse rates of 0-2000 pps in JOG mode or produce SLEW pulse rates of 0-15,000 pps in RUN mode. The RUN mode provides the ramping from EFSS to SLEW (acceleration) and SLEW to EFSS (deceleration); both acceleration and deceleration times are adjustable by trim potentiometers on the translator. The translator can be operated by either CLOCK and DIRECTION inputs, or CW CLOCK and CCW CLOCK inputs.

Further explanation of all functions available are described on page 8 and 9. The following are terms used throughout this manual:

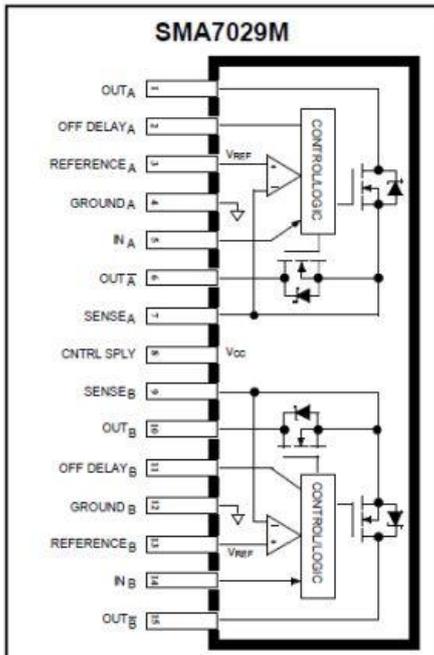
<b>FULL STEP (2θ ON)</b>	A mode where two phases of a 4 phase winding step motor are always energized in sequence.
<b>HALF STEP (1θ-2θ)</b>	A mode where one or two phases of a 4 phase winding step motor are alternately energized in sequence.
<b>EFSS (ERROR FREE STOP/START)</b>	The low (basic) speed range where the motor can be started and stopped without losing or gaining steps.
<b>SLEW</b>	The high speed range where the motor may be operated using acceleration and deceleration control. The motor may stall or lose/gain steps if an attempt is made to start or stop in the slew range without appropriate accel-decel control.
<b>CW</b>	Refers to the motor shaft turning in the clockwise direction while viewing from mounting face of motor.
<b>CCW</b>	Refers to the motor shaft turning in the counter-clockwise direction while viewing from the mounting face of motor.

### TRANSLATOR SPECIFICATIONS

<b>Maximums:</b>	
Motor Current .....	5 Amp/θ
V(+)	40VDC
EFSS Rate .....	0-2000 pps
SLEW Rate .....	0-15,000 pps
Accel and Decel Time .....	approx. 50-500msec (adjustable)

# SLA7024M, SLA7026M, AND SMA7029M

## HIGH-CURRENT PWM, UNIPOLAR STEPPER MOTOR CONTROLLER/DRIVERS



Dwg. PK-007

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS at $T_A = +25^\circ\text{C}$

Load Supply Voltage, $V_{BB}$ .....	46 V
FET Output Voltage, $V_{DS}$ .....	100 V
Control Supply Voltage, $V_{CC}$ .....	46 V
Peak Output Current, $I_{OUTM}$ ( $t_w \leq 100 \mu\text{s}$ )	
SLA7024M .....	3.0 A
SLA7026M .....	5.0 A
SMA7029M .....	3.0 A
Continuous Output Current, $I_{OUT}$	
SLA7024M .....	1.5 A
SLA7026M .....	3.0 A
SMA7029M .....	1.5 A
Input Voltage Range, $V_{IN}$ .....	-0.3 V to 7.0 V
Reference Voltage, $V_{REF}$ .....	2.0 V
Package Power Dissipation, $P_D$ ..	See Graph
Junction Temperature, $T_J$ .....	+150°C
Operating Temperature Range, $T_A$ .....	-20°C to +85°C
Storage Temperature Range, $T_{stg}$ .....	-40°C to +150°C

The SLA7024M, SLA7026M, and SMA7029M are designed for high-efficiency and high-performance operation of 2-phase, unipolar stepper motors. An automated, innovative packaging technology combined with power FETs and monolithic logic/control circuitry advances power multi-chip modules (PMCMs™) toward the complete integration of motion control. Highly automated manufacturing techniques provide low-cost and exceptionally reliable PMCMs suitable for controlling and directly driving a broad range of 2-phase, unipolar stepper motors. The three stepper motor multi-chip modules differ primarily in output current ratings (1.5 A or 3.0 A) and package style.

All three PMCMs are rated for an absolute maximum limit of 46 V and utilize advanced NMOS FETs for the high-current, high-voltage driver outputs. The avalanche-rated ( $\geq 100$  V) FETs provide excellent ON resistance, improved body diodes, and very-fast switching. The multi-chip ratings and performance afford significant benefits and advantages for stepper drives when compared to the higher dissipation and slower switching speeds associated with bipolar transistors. Normally, heat sinks are not required for the SLA7024M or SMA7029M. The SLA7026M, in demanding, higher-current systems designs, necessitates suitable heat transfer methods for reliable operation.

Complete applications information is given on the following pages. PWM current is regulated by appropriately choosing current-sensing resistors, a voltage divider, and RC timing networks. The RC components limit the OFF interval and control current decay. Inputs are compatible with 5 V logic and microprocessors.

### BENEFITS AND FEATURES

- Cost-Effective, Multi-Chip Solution
- 'Turn-Key' Motion-Control Module
- Motor Operation to 3 A and 46 V
- 3<sup>rd</sup> Generation High-Voltage FETs
- 100 V, Avalanche-Rated NMOS
- Low  $r_{DS(on)}$  NMOS Outputs
- Advanced, Improved Body Diodes
- Single-Supply Motor/Module Operation
- Half- or Full-Step Unipolar Drive
- High-Efficiency, High-Speed PWM
- Dual PWM Current Control (2-Phase)
- Programmable PWM Current Control
- Low Component Count PWM Drive
- Low Internal Power Dissipation
- Heat Sinking (Normally) Unnecessary
- Electrically Isolated Power Tab
- Logic IC- and  $\mu\text{P}$ -Compatible Inputs
- Machine-Insertable Package

Always order by complete part number:

Part Number	Package	Output Current
SLA7024M	18-Lead Power-Tab SIP	1.5 A
SLA7026M	18-Lead Power-Tab SIP	3.0 A
SMA7029M	15-Lead SIP	1.5 A



## Anexo B.3 Microcontrolador PIC16F877



# PIC16F87X

## 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

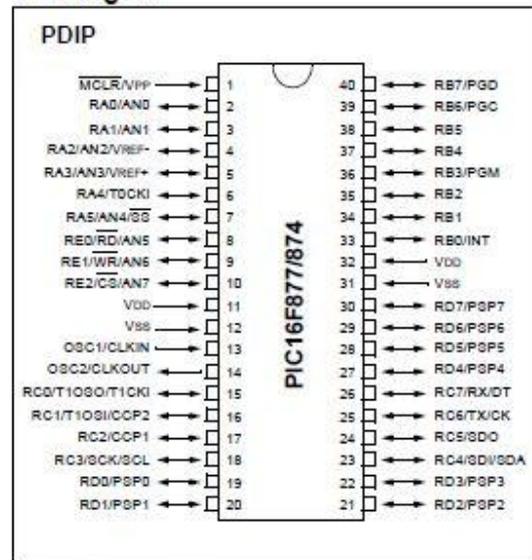
### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

### Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input  
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and  
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM  
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two  
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature  
ranges
- Low-power consumption:
  - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
  - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 µA typical standby current

### Pin Diagram



### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during SLEEP via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master  
mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with  
external  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$  and  $\overline{CS}$  controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

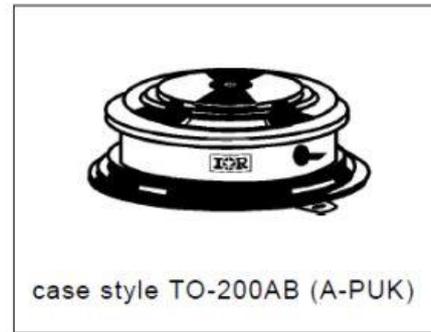
410A

**Features**

- Center amplifying gate
- Metal case with ceramic insulator
- International standard case TO-200AB (A-PUK)

**Typical Applications**

- DC motor controls
- Controlled DC power supplies
- AC controllers



**Major Ratings and Characteristics**

Parameters	ST230C..C	Units
$I_{T(AV)}$	410	A
@ $T_{hs}$	55	°C
$I_{T(RMS)}$	780	A
@ $T_{hs}$	25	°C
$I_{TSM}$	@ 50Hz 5700	A
	@ 60Hz 5970	A
$I^2t$	@ 50Hz 163	KA <sup>2</sup> s
	@ 60Hz 149	KA <sup>2</sup> s
$V_{DRM}/V_{RRM}$	400 to 1600	V
$t_q$ typical	100	µs
$T_j$	- 40 to 125	°C