

7/9 2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
CONTROLADOR DIGITAL PARA LA TEMPERATURA
DE UN HORNO DE 20°C A 1000°C

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N
MICHEL G. INOSTROZA PUK
HUGO LINARES PEREZ
JOSE ENRIQUE LOPEZ LARA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1990





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Indice	i
Introducción	v
CA PITULO I	
Descripción del Sistema	I-1
CA PITULO II	
Hornos	II-1
II.1 Tipos de Hornos	II-1
II.1.a) Hornos Eléctricos	II-1
II.2 Control de Hornos	II-4
II.3 Horno del Sistema	II-8
CA PITULO III	
Sistema de Potencia	III-1
III.1 Introducción a Tiristores	III-1
III.1.a.) Construcción y Operación del Tiristor	III-2
III.1.b.) Aplicaciones del Tiristor	III-6

III..1.c.) Sistemas de Tiristores o Convertidores	III-8
III.2. Rectificadores Controlados	III-10
III.2.a.) Tipos de Rectificadores Controlados	III-11
III.3. Rectificadores de Tres Fases	III-15
III.3.a.) Comportamiento del Rectificador Trifásico de Onda Completa	III-15
III.3.b.) Comportamiento del Rectificador Semiconvertidor	III-18
III.4. Selección del Circuito de Potencia	III-21
III.5. Diseño y Construcción del Circuito de Disparo de los Tiristores a Utilizar	III-22
III.5.a) Cálculo y Funcionamiento del Circuito de Disparo	III-26
ANEXO 1 - Gráficas del Voltaje de Salida del Circuito de Potencia	III-A
ANEXO 2 - Cálculos del Circuito de Potencia	III-C
ANEXO 3 - Diagrama Eléctrico del Circuito de Disparo ...	III-H

CAPITULO IV

Sistema Digital	IV-1
IV.1. Descripción del Sistema	IV-1
IV.2. Hardware del Sistema	IV-2
IV.2.a.) Microprocesador	IV-3
IV.2.b) Circuitos Periféricos	IV-8
IV.3. Software del Sistema	IV-12
ANEXO 1 - Diagrama Eléctrico del Circuito Digital	IV-A
ANEXO 2 - Listado del Programa	IV-B

CAPITULO V

Circuitos de Instrumentación	V-1
V.1. Circuito Sensor de Temperatura	V-1
V.2. Circuito Sensor de Corriente	V-8
ANEXO 1 - Sensores de Temperatura	V-A

CAPITULO VI

Conclusiones..... IV-1

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION.

En sus dos décadas de existencia, el Metro de la ciudad de México se ha beneficiado de los últimos adelantos en electrónica, comunicaciones y otros campos del conocimiento. Este vertiginoso avance tecnológico obliga a incrementar constantemente los esfuerzos, para avanzar exitosamente hacia nuevas etapas de desarrollo, esfuerzos que deberán vincularse al proceso de modernización nacional para lograr los frutos deseados.

Este trabajo de Tesis responde a la necesidad de contribuir a la investigación que se realiza en los Laboratorios de Eléctrica y Electrónica de la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), a través del diseño e implementación de un Controlador Digital para un horno que alcanza temperaturas entre 20°C y 1000°C. Este se utiliza para realizar pruebas a diversos materiales, sustancias y equipo del sistema, como de la industria privada, considerando la respuesta al calor.

El objetivo de nuestro trabajo es el diseño y construcción de los circuitos que componen el sistema con el fin de automatizar el proceso de pruebas térmicas de materiales, las que hasta este momento se realizaban en forma manual. Se pretende lograr así una mayor precisión y pruebas más variadas y complejas, sin la presencia de un operador durante el proceso.

El control diseñado, objeto de esta Tesis, se implementó en un horno Blue M con que se cuenta en el Laboratorio de Eléctrica y Electrónica cuyo rango máximo de temperatura es de 343°C, no obstante el diseño permite cubrir un rango máximo de 1000°C, siendo nuestro sistema de fácil transportación y adaptación a cualquier horno de las mismas características.

A continuación se presenta un breve resumen del capitulo de este trabajo.

El primer capítulo muestra un panorama general del sistema completo y describe brevemente al controlador, basándose en un diagrama de bloque sencillo.

El segundo capítulo establece un breve y general estudio de los distintos tipos y variedades de hornos, describiendo finalmente, en forma detallada, el horno que se utilizó.

El tercer capítulo está dedicado al sistema de potencia; primero se describe la teoría de los tiristores y los circuitos de rectificadores controlados básicos, detallando el circuito del sistema.

El cuarto capítulo se refiere al sistema digital, así como a su programación.

En el quinto capítulo se describen los circuitos de instrumentación y los sensores (como el termopar y el shunt) utilizados en el sistema.

El sexto capítulo, por último, se refiere a las conclusiones y recomendaciones del sistema desarrollado en esta tesis.

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL SISTEMA

DESCRIPCION DEL SISTEMA

En este capítulo describiremos, en forma general, el sistema de control de temperatura del horno Blue M, sistema que se diseñó y construyó para realización del presente trabajo de tesis y cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura I.1.

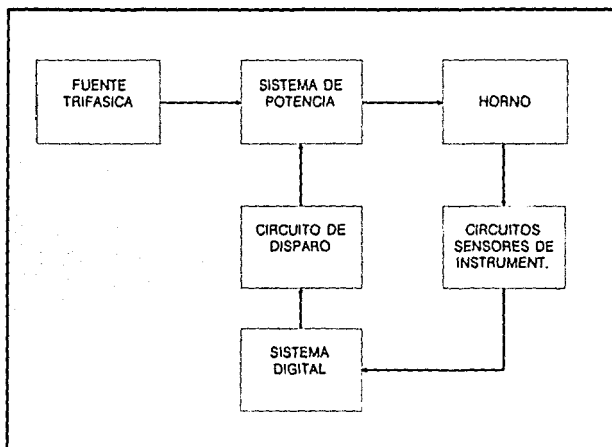


FIG.1. Diagrama de bloques del Sistema Controlador de Temperatura del Horno

El control de la temperatura del horno consiste de dos partes: Sistema Digital y Sistema de Potencia.

El Horno es el sistema a controlar y básicamente está compuesto de una resistencia de tungsteno, la que al variar su voltaje presenta un cambio en el calor que radia, variando así la temperatura.

El Sistema Digital es el que decide, por medio del análisis de las señales que proporcionan los circuitos sensores de instrumentación, si se va a suministrar una mayor o menor potencia al sistema del horno. De esta forma, se tiene un control retroalimentado. Este consiste en un circuito programable basado en un microprocesador, cuya función es procesar las señales provenientes de los sensores instalados en el horno (termopar y shunt), comparándola con una referencia previamente establecida para tomar una decisión. Este sistema actúa sobre el circuito de potencia, que es el regulador de la energía aplicada en el horno.

Los circuitos sensores, consisten en amplificadores de instrumentación, cuya función es amplificar las señales provenientes de los transductores : termopar y shunt, dada su respuesta, que es en función de voltajes muy pequeños, del orden de los microvolts. Estos circuitos entregan señales con niveles de 0 a 5V, que el circuito digital se encargará de interpretar, como ya se menciono anteriormente.

El sistema de potencia consiste en un rectificador trifásico controlado, basado en tiristores, que convierten corriente alterna trifásica en corriente directa; y de un circuito de disparo, cuya función es limitar el tiempo de conducción de estos tiristores. Este sistema puede compararse con el funcionamiento de una válvula cuya abertura es controlada por la señal proveniente del sistema digital. De esta forma la potencia de salida hacia el horno es manejada según las necesidades del sistema. El circuito de disparo esta aislado de la etapa de potencia por medio de transformadores, protegiendolo de esta forma, contra los transitorios que se generan en la línea por efectos de conmutación de los tiristores o por posibles fallas en la energía de alimentación o cualquier otra causa externa.

Cada etapa del diagrama de bloques se explica en detalle en los siguientes capítulos de este trabajo.

CAPITULO II

HORNOS

HORNOS

En el presente capítulo se dará una breve explicación acerca de los tipos de hornos más utilizados en la industria, así como la descripción del horno sobre el cual se desarrolló nuestro trabajo.

II.1. TIPOS DE HORNOS.

Un horno es un dispositivo que convierte la energía eléctrica o la energía química de un combustible en calor, utilizándose para aumentar la temperatura de aquellos materiales denominados "carga", que se ponen en su interior. Existe una gran variedad de hornos. Los hornos que operan hasta unos 300°C se conocen con el nombre de estufas. El vidrio se funde en hornos de balsa. En la preparación de las menas, para su tratamiento posterior, se utilizan los hornos de sinterización. En este trabajo nos abocaremos a los hornos eléctricos, cuyas características se describen a continuación.

II.1.a) HORNOS ELECTRICOS.

Existen cuatro tipos de hornos eléctricos:

1. Hornos de Resistencia.
2. Hornos de Arco.
3. Horno de Inducción.
4. Horno de Capacitancia.

1. HORNOS DE RESISTENCIA. En la calefacción por resistencia, pasa una corriente eléctrica a lo largo de un conductor (resistencia). La energía disipada vendrá dada por la potencia suministrada entre el tiempo, lo que se ilustra en la siguiente ecuación:

$$\text{Energía} = \frac{\text{Watts}}{\text{seg}} = \frac{VI}{t} = \frac{RI^2}{t}$$

Donde V es el voltaje aplicado entre los extremos de la resistencia, I la intensidad de la corriente eléctrica (en amperes), R es la resistencia del horno (en ohms) y t el tiempo en que pasa la corriente eléctrica (en segundos).

Un gran número de materiales puede utilizarse como resistencia. Se clasifican en materiales de alta y de baja resistencia específica. Los de valores altos presentan ciertas ventajas, pero, en la práctica, se suelen utilizar bajos voltajes e intensidades elevadas. La calefacción con resistencias está limitada a temperaturas moderadamente altas; esto es, hasta 1200°C, excepto en aplicaciones especiales. Las resistencias utilizadas en estos hornos no son rectas, sino que son arrolladas en espiral. Con ello, parte del calor radiado se refleja dentro de la hélice, de modo que para igual potencia consumida se alcanza una temperatura más alta. En otras palabras, la temperatura del elemento se puede mantener con un consumo de potencia más bajo.

La calefacción por resistencia en todas sus formas se utiliza mucho en el laboratorio, por su fácil control y limpieza. Su costo es demasiado alto para las aplicaciones industriales, por lo que no se emplea normalmente. Las ventajas principales de este tipo de horno son su facilidad de control, uniformidad en la calefacción y la ausencia de gases de combustión. Este tipo de calefacción se usa en hornos con calefacción forzada de aire, diseñada para calefacción uniforme con temperaturas inferiores a los 700°C.

2. HORNOS POR ARCO ELECTRICO. Es una forma especial de la calefacción por resistencia, en donde la resistencia es el plasma (atmósfera ionizada) creado en el espacio comprendido entre los dos electrodos. La masa de esta resistencia es muy pequeña, pero es indestructible y opera a temperaturas extremadamente elevadas (alrededor de los 5000°C). Se usa principalmente en la manufactura de aceros especiales. Se puede usar corriente alterna o directa; si se usa alterna, ésta puede ser monofásica o polifásica. El consumo de potencia es muy alto (5000A a 100V).

3. HORNO DE INDUCCION. Es también un tipo especial de calentamiento por resistencia. En este caso, la resistencia es la propia carga en la cual se induce una corriente eléctrica. Su principio es el mismo que el del transformador: la corriente se lleva a través de un circuito primario, de manera que induzca una corriente en un secundario cortocircuitado, que es la carga a calentar. Entre esta clase de hornos se distinguen dos tipos importantes, el tipo nucleado y el tipo sin núcleo. La fusión por inducción se utiliza para la fabricación de aceros especiales y de otras aleaciones de alto punto de fusión. El calentamiento por inducción para tratamientos térmicos permite calentamientos muy rápidos.

4. HORNOS DE CAPACITANCIA. Se puede aplicar a los materiales no conductores. La carga se sitúa entre los electrodos, formando en conjunto un capacitor intercalado en el circuito. Si se somete el conjunto a voltajes alternos de alta frecuencia, la carga se calentará por fricción molecular, como sucede en una varilla metálica sometida a flexiones alternadas. La potencia desarrollada está dada por:

$$P = fIV^2$$

Donde P es la potencia, f la frecuencia y V e I el voltaje y la corriente respectivamente. De esta ecuación observamos que se puede obtener una mayor potencia incrementando ya sea el voltaje o la frecuencia. Los altos voltajes conducirán a la

formación de arco. Para evitar esto, se emplean frecuencias de 200MHz para calentamientos muy rápidos de materiales. La ventaja de este tipo de hornos es que el calor se desarrolla en toda la masa y no sólo en la superficie.

II.2. CONTROL DE HORNOS.

La instrumentación de un control de hornos se hace complicada en cuanto mayores sean las exigencias de control en el proceso y se pretenda incrementar la eficiencia de las operaciones. La medida de la temperatura se utiliza como base para controlar la entrada de excitación (voltaje, corriente y combustible, según el caso). Aparte del control de procesos, los registros gráficos del consumo de combustible (como lo son el aire, oxígeno y vapor) son datos económicos muy útiles para el análisis de costos.

Los transductores utilizados para la medición de la temperatura como (termopares, termistores o pequeños desplazamientos de líquidos en tubos diferenciales), producen señales que, transmitidas mediante dispositivos mecánicos, hidráulicos o eléctricos, deberán activar los aparatos indicadores. La interpretación de estas señales implica que se utilizarán para accionar interruptores, abrir o cerrar válvulas o activar un circuito electrónico de control.

Cuando se controla un horno a una temperatura determinada, debería existir idealmente un estado estacionario en el que la cantidad de calor que entra equilibrará exactamente todas las pérdidas. Cualquier variación que se produzca en las pérdidas romperá el equilibrio y se detectará por un cambio en la temperatura del horno. La función del control es ajustar la entrada de calor, de manera que se vuelva a establecer el equilibrio tan rápido como sea posible, recuperándose la temperatura original. En la práctica, las pérdidas térmicas pueden variar continuamente, en cuyo caso no sería posible conseguir un control ideal.

La mayoría de los sistemas de control tienen oscilaciones o fluctuaciones, por lo que se obtiene una variación cíclica de la temperatura alrededor del valor deseado. Este se debe a los tiempos de respuesta, lo que supone pérdidas de tiempo inevitables a todo sistema de control.

El más importante de éstos es el tiempo de respuesta del proceso, que es inherente al equipo controlado. En un horno, se debe principalmente a la inercia térmica del mismo y de la carga. Esta inercia puede ser función compleja de la masa, del calor específico y de la conductividad.

En segundo lugar, se tiene un tiempo de medida que también es inevitable, porque no se puede detectar un cambio de temperatura antes de que haya sucedido; lo normal es que la detección se realice un tiempo después. Otras causas de la inercia de medida incluyen la caída de temperatura, a través de la estructura del termopar.

En tercer lugar está el tiempo de control, que viene dado por el tiempo que se necesita para actuar los circuitos electrónicos, motores y válvulas.

Existen varios tipos de control, que suponen diferentes grados de complejidad y que se emplean para realizar un control adecuado. A continuación se describen los más importantes:

Control de Pasos.

En este control se realiza simplemente la conmutación de la alimentación entre dos valores: apagado o encendido. El control de pasos múltiples supone una conmutación dentro de una serie de posiciones o valores, tales como 1/4, 1/2, 3/4 o total. Como es difícil que alguno de los valores conmutables corresponda exacta-

mente a la alimentación ideal, resultan prácticamente inevitables las variaciones continuas.

El tiempo durante el cual la alimentación se mantenga por encima o por debajo del valor ideal dependerá de la relación entre el mismo y los valores conmutables de que se disponga, para la entrada de calor.

El control por pasos da buenos resultados cuando la capacidad del proceso es suficientemente alta para que la respuesta a la variación del calor que entra no sea muy drástica. El tiempo de respuesta del proceso debería ser bajo (es decir buena conductividad térmica) y cualquier cambio en la carga deberá ser pequeño, cuanto menos rápida sea la compensación del mismo.

Control Integral.

Este tipo de control permite la variación continua de la entrada de calor entre los límites que pueda abarcar un ámbito completo (desde el mínimo hasta el máximo valor), aunque normalmente sólo cubre una parte de este intervalo. El resultado no tiene por qué ser distinto al del control por pasos, ya que la alimentación puede adoptar uno de los valores extremos y seguir en el mismo, hasta que cambie el signo de la desviación. La velocidad de variación de la alimentación puede ser constante, o bien, depender de la magnitud de la diferencia entre la temperatura ideal y real, con el fin de acortar las respuestas en situaciones que impliquen desviaciones rápidas.

Este tipo de control resulta de particular utilidad cuando es baja la capacidad del proceso, admitiendo cambios de importancia en la carga siempre que no sean demasiado bruscos.

Control Proporcional.

El control proporcional impone a la alimentación un valor que es proporcional a la desviación detectada de la temperatura instantánea, respecto de la requerida. Usualmente, se dispone que opere dentro de una banda de temperaturas ($\pm 3^{\circ}\text{C}$ por ejemplo) alrededor de lo deseado. Otro tipo de control complementará su trabajo llevando la temperatura hasta alcanzar la banda citada. El presente tipo de control puede utilizarse cuando el tiempo de respuesta del proceso sea elevado y se prevean pequeñas variaciones de carga. La temperatura y la alimentación de calor se aproximan a su valor ideal de manera simultánea.

Control Proporcional Integrativo.

Si la carga del horno varía con el tiempo, también lo hará la alimentación ideal requerida para mantener la temperatura deseada. Entonces, es conveniente recurrir al control proporcional integrativo en el que la precisión es flotante, de forma que la alimentación cambie subiendo o bajando, según los requerimientos del sistema.

Control Derivativo.

El control derivativo se utiliza cuando la condición controlada varía con gran rapidez. La velocidad de alimentación cambia su valor ideal proporcionalmente a la velocidad con que se altera la desviación de la temperatura. De esta manera, se introduce cierto grado de anticipación.

Este tipo de control no puede utilizarse aislado, pero sí conjuntamente con alguno de los controles mencionados anteriormente, dando como resultado una mayor capacidad del proceso. Esto implica una instrumentación más compleja, en

gran parte electrónica, con la utilización de microprocesadores y microcomputadoras.

El secreto del control es conseguir una coordinación perfecta entre el sistema de control y las características del sistema que se está controlando, para obtener una mayor eficiencia.

II.3. HORNO DEL SISTEMA.

El sistema a controlar en este trabajo es un horno eléctrico de resistencia y sistema de ventilación, marca Blue-M, modelo POM-206C-1, que se utiliza para realizar pruebas térmicas de diversos materiales mecánicos utilizados en la industria. Esto se realiza como parte del área de control de calidad, en el Laboratorio de Eléctrica y Electrónica de la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo, en el STC (Metro).

Las especificaciones de este horno son las siguientes:

Dimensiones	1.5x1x1 m (alto, ancho, largo)
Rango de Temperatura	20°C a 343°C.
Potencia Total	3.9 KVA.
Motor Ventilador	1/4 HP.
Líneas de corriente	15 Amperes.
Resistencia	13.4 ohms.

El sistema que controla al Horno, así como la estructura general de éste, se muestran en la Figura II.1.

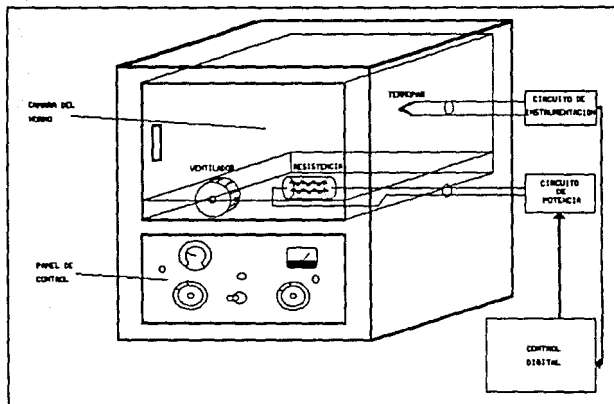


Fig.II.1. Diagrama esquemático del sistema de control del horno

Al horno lo podemos estudiar dividiéndolo en dos partes: el panel de control y la cámara del horno.

En la Figura II.2 se muestra el diagrama del panel de control analógico.

El panel de control es el conjunto de instrumentos de medición analógica que se encuentran instalados en la parte baja del horno y que forman parte de la operación de éste.

A continuación se explica el funcionamiento de cada uno de ellos.

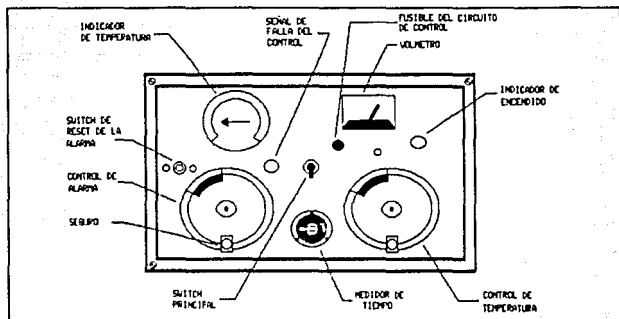


Fig.II.2. Diagrama del panel de control analógico del horno.

- Switch off/on principal
- Luz piloto; indica el estado del sistema (off/on).
- Control de potencia (Power o Matic 60). Esta parte regula la temperatura del horno. Por razones del nuevo diseño, fue desconectada de la resistencia del horno, sustituyéndola por la fuente rectificadora de potencia desarrollado en esta tesis.
- Medidor de temperatura. Este sistema sensa la temperatura mediante un termostato. Se utilizaba para reinicio automático, en caso de una sobretemperatura que la fijada inicialmente (Instrumento no conectado).
- Luz de señalización. Indica cuándo la unidad se encuentra en la condición de máxima temperatura.

- Voltmetro. Este mide el voltaje aplicado a la resistencia, para el control de la temperatura.

- Fusible . Este protege de corrientes excesivas o de corto circuito a todo el circuito del horno.

- Medidor de tiempo. Sirve para observar el tiempo transcurrido desde el momento de la activación del horno.

- Indicador de potencia. Nos indica el porcentaje de potencia suministrada al horno (parte no conectada).

- Rango de Protección. Este dispositivo limita el voltaje aplicado a la resistencia del horno a un valor determinado, de tal manera que al llegar a éste suena una alarma indicadora.

En la Cámara del Horno se tienen los siguientes dispositivos:

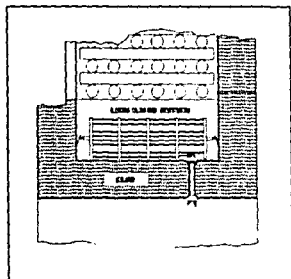


Fig.11.3. Sección transversal de la resistencia del horno.

- La Resistencia del horno, que se encuentra en un compartimiento en la parte inferior de la cámara, está hecha de una aleación de tungsteno de gran conductividad térmica y es la que aplica la ley de Joule convirtiendo la energía eléctrica en calorífica. Es de aproximadamente 30 cm y se encuentra arroyada en un material cerámico, para lograr una mayor disipación por reflejo. Ver Figura 11.3.

Sistema de Ventilación. Este sistema tiene la función de hacer fluir y distribuir uniformemente el aire en toda la cámara del horno, aprovechando así el fenómeno de convección del calor. Véase la Figura II.4

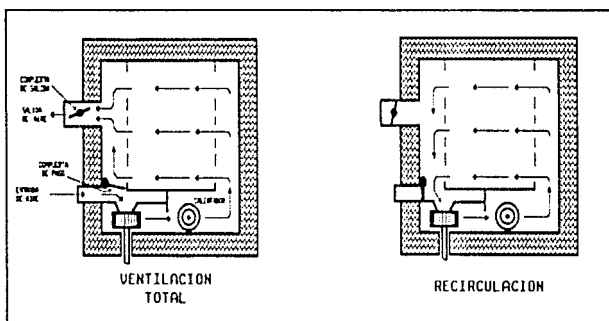


Fig.II.4. Sistema de ventilación y recirculación de aire.

En la cámara también se encuentran dos conductos, por donde se realiza una transferencia de calor con el exterior. Por razones de diseño, estos conductos permanecerán cerrados para evitar pérdidas de calor en el horno, reduciendo así el tiempo de prueba debido a la máxima transferencia térmica a la carga del horno.

CAPITULO III

SISTEMA DE POTENCIA

SISTEMA DE POTENCIA

En este capítulo se presentan los conceptos básicos que fundamentan el estudio del circuito de potencia utilizado, además de los cálculos, diseño y construcción referente a éste.

III.1. INTRODUCCION A TIRISTORES

El control de grandes bloques de potencia por medio de los semiconductores comenzó en 1960.

El componente principal de un circuito electrónico de potencia es el tiristor. Este es un semiconductor de conmutación rápida y su función consiste en modular la potencia de los sistemas de corriente alterna y continua. Todos los otros componentes tienen por objeto proteger o activar a los tiristores.

Para las aplicaciones de potencia, los conmutadores controlados de semiconductor más importantes son: el rectificador controlado de silicio (SCR), que es un interruptor unidireccional de potencia; y el triac, que es un interruptor bidireccional de potencia.

Fundamentalmente, el tiristor es un dispositivo de conexión-desconexión o conducción-corte, pero puede ser controlado linealmente si su salida es promediada en el tiempo, de modo que sea útil para accionar motores eléctricos.

Se puede obtener un suministro en continua partiendo de un suministro en alterna; o bien, una fuente de frecuencia variable, partiendo de una frecuencia fija. La electrónica de potencia es versátil.

El tiristor es adecuado para el manejo de grandes potencias debido a que pesa poco, es fiable y de acción rápida. Es activado o puesto en conducción con pequeña potencia y está exento de dificultades mecánicas, en virtud de que no tiene partes móviles, aunque también este dispositivo tiene algunas desventajas. Cuando el tiristor es disparado y conduce corriente, hay una caída de tensión directa de aproximadamente 1.5V. Por esta razón, estos dispositivos de potencia tienen una limitación térmica.

Sin embargo, a pesar de los inconvenientes son cada vez más numerosas las instalaciones que utilizan tiristores y cada vez se fabrican éstos de mayor capacidad.

III.1.a) CONSTRUCCION Y OPERACION DEL TIRISTOR

El SCR es un rectificador de silicio, con un tercer terminal para fines de control. La operación básica del SCR es diferente a la del diodo semiconductor de dos capas, donde el tercer terminal, denominado compuerta, determina cuándo conmuta el rectificador del estado de circuito abierto al de circuito cerrado. El símbolo gráfico para el SCR se muestra en la Figura III.1.

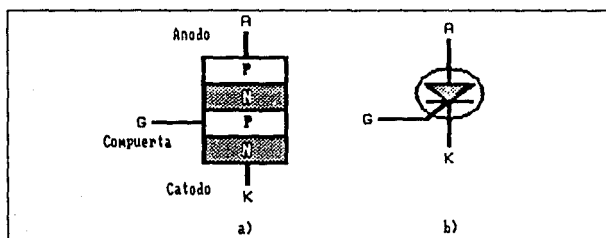


Fig.III.1. (a) Estructura, (b) símbolo del Tiristor

La forma más usual de explicar la operación de un tiristor es considerar los cuatro extractos (pnpn) que se muestran en la Figura III.1., como la interconexión de dos transistores, tal como se observa en la Figura III.2.

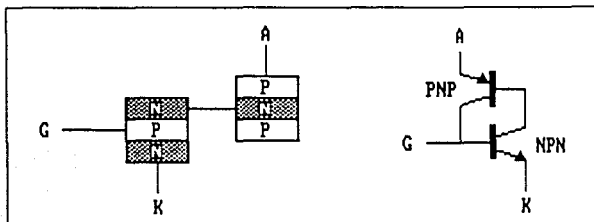


Fig.III.2. Circuito equivalente del tiristor con transistores.

La acción combinada de los transistores pnp y npn puede ser deducida del circuito de la Figura III.3., la cual nos muestra: la corriente de la carga I_L , la corriente de la compuerta I_G , la corriente de colector del transistor T_1 (I_{C1}) y la corriente de colector de T_2 (I_{C2}).

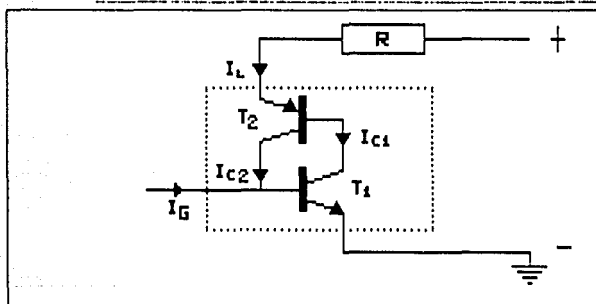


Fig.III.3. Circuito que muestra la acción de un tiristor en términos de un circuito equivalente con transistores.

La ganancia de corriente del emisor común de d.c. de los transistores T_1 y T_2 , serán denotados por β_1 y β_2 , respectivamente.

De las ecuaciones de un transistor tenemos que:

$$I_C = \beta I_B \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde:

I_C = Corriente en el colector

I_E = Corriente en el emisor

I_B = Corriente en la base

β = Ganancia de d.c.

Del circuito observamos que:

$$I_{B1} = I_{C2} + I_G \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

$$I_{B2} = I_{C1} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

Sustituyendo la ecuación (3.3) y (3.4) en (3.1) tenemos:

$$I_{C1} = \beta_1 (I_{C2} + I_G) \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

$$I_{C2} = \beta_2 (I_{C1}) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

Resolviendo las ecuaciones (3.5) y (3.6) y despejando I_{C1} e I_{C2}

$$I_{C1} = \frac{\beta_1 I_G}{1 - \beta_1 \beta_2} \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

$$I_{C2} = \frac{\beta_1 \beta_2 I_G}{1 - \beta_1 \beta_2} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

finalmente:

$$I_L = I_{E2} = I_{C1} + I_{C2} = \frac{\beta_1 (1 + \beta_2) I_G}{1 - \beta_1 \beta_2} \dots\dots(3.9)$$

Se puede observar que si el valor de $\beta_1\beta_2$ se aproxima a la unidad, la corriente en la carga, de acuerdo a la ecuación (3.9), tenderá a infinito. En la práctica, por supuesto, esto estará limitado por la carga externa, que junto con el tiristor funcionará como un switch cerrado.

La ganancia de corriente de todos los transistores decrece con valores bajos de corriente de base. El tiristor es construido de tal forma que, cuando la corriente externa de la compuerta es cero, el producto de la ganancia de corriente es menor que la unidad. Cuando la corriente de la compuerta es incrementada, rápidamente $\beta_1\beta_2$ alcanza la unidad y el tiristor se activa (ON).

El tiristor no conducirá hasta tanto una corriente de pulsos no fluya en la compuerta del circuito. Una vez que éste ha sido activado, se tiene una acción de control y el dispositivo empezará la conducción hasta que la fuente de voltaje cambié de sentido. La Figura III.4. ilustra esta propiedad en un circuito sencillo.

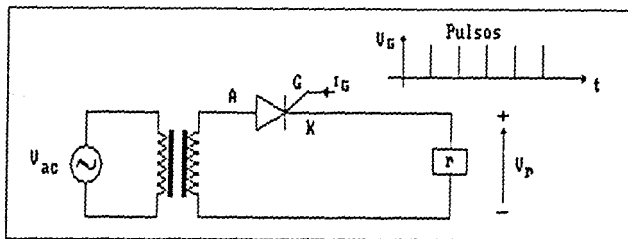


Fig.III.4.(a). Circuito simple.

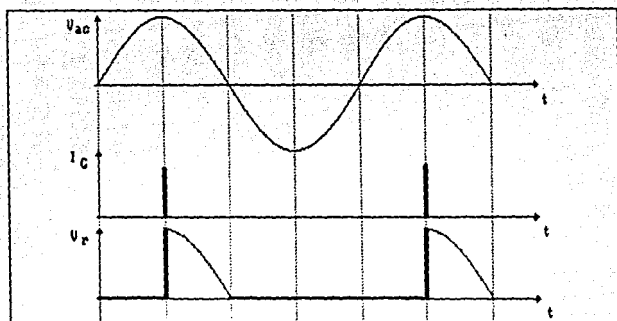


Fig.III.4.b) Gráficas del circuito simple.

La señal de entrada de voltaje de corriente alterna es rectificadada.

La conducción no ocurre hasta que una corriente de pulsos no fluya desde la compuerta al catodo. La fase de los pulsos de la compuerta, relativo a la fuente de corriente alterna, controlará la parte de la onda transmitida por el tiristor en el momento de ser activada.

III.1.b) APLICACIONES DEL TIRISTOR

Una aplicación importante de la electrónica de potencia es el control de motores eléctricos. Hay otros campos importantes de aplicación, tales como la conversión general de potencia, el calentamiento por inducción, el control de intensidad de las lámparas y fuentes de alimentación de emergencia.

Los tiristores se utilizan en sistemas que van desde la aplicación doméstica de taladros, mezcladores y acondicionamiento de aire, hasta los sistemas de propulsión que se utilizan en la industria textil y en centrales eléctricas controladas por semiconductores para excitar los turbo-alternadores, así como en instalaciones de plantas siderúrgicas.

En talleres de laminado, las transmisiones o propulsiones por motores de corriente directa de velocidad ajustable se han controlado usualmente por grupos motor-generator, que proveen la tensión continua variable y reversible. Los grupos motor-generator están siendo reemplazados por instalaciones electrónicas de potencia. El resultado ha sido una mejora en la economía, un mayor rendimiento, mayor fiabilidad, menos mantenimiento y una respuesta más rápida.

En los vehículos eléctricos, los motores monofásicos de alterna están siendo reemplazados por equipos con tiristores y motores de corriente directa, a causa de las dificultades de conmutación en las máquinas de corriente alterna.

Un sistema convertidor con tiristores y motor de corriente directa es más barato que el sistema inversor y motor de corriente alterna. Este último se utiliza en circunstancias especiales, donde el ambiente de trabajo no permite el uso de escobillas y colector, como ocurre en el campo de la aviación o en las minas.

La regulación de temperatura es una de las aplicaciones óptimas de tiristores y triacs y dan lugar a un número considerable de circuitos. Sobre esta aplicación es el tema que se desarrollará en los capítulos posteriores.

Entre otras aplicaciones se encuentran: cargadores de baterías; barrido de líneas de tv; detector fotosensible; montajes con captador fotoeléctrico; detección de fases en una red trifásica; control de transductores electromecánicos a potencia

constante; conmutación complementaria; protección por corto circuito; temporizadores y relojerías; graduador regulado de luz para fotografía; etc... .

III.1.c) SISTEMAS DE TIRISTORES O CONVERTIDORES

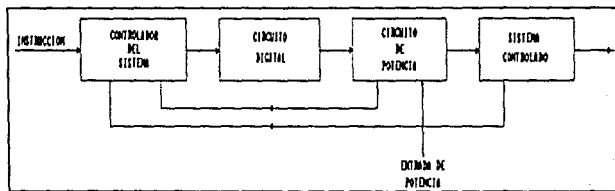


Fig.III.5. Diagrama de bloques de un convertidor.

Las principales partes de un convertidor se muestran en el diagrama de bloques de la Figura III.5., en donde cada parte tiene las siguientes características:

1. El circuito de potencia, cuya salida debe ser una variable directa, una fuente de voltaje directa o una fuente alterna de voltaje y frecuencia.
2. El circuito digital, el cual, en respuesta a la señal del controlador del sistema, dispara o apaga los tiristores del circuito de potencia en los instantes apropiados.
3. El sistema controlado, que puede ser un motor o una carga con una apropiada realimentación.

4. El controlador del sistema, el que en respuesta a las instrucciones y a las señales de realimentación, manda las señales apropiadas de control al circuito digital.

Cualquier sistema de potencia utilizado para rectificar, invertir o modular la salida de potencia de una fuente de energía de corriente alterna o directa, recibe el nombre de sistema de convertidores.

Estos sistemas se clasifican de acuerdo a la función que realizan y al método de conmutación que emplean.

Algunos tipos de sistemas de convertidores son los siguientes:

1. Controladores de voltaje de corriente alterna (ac); convierten un voltaje fijo de ac en un voltaje variable de ac.
2. Rectificadores no controlados; convierten un voltaje fijo de ac en un voltaje fijo de dc (corriente directa).
3. Rectificadores controlados; convierten un voltaje fijo de ac en un voltaje variable de dc.^(*)
4. Choppers; convierten un voltaje fijo de dc en un voltaje variable de dc.

* Este tipo de convertidor es el utilizado en nuestro sistema de potencia.

5. Inversores no controlados; convierten un voltaje fijo de dc en un voltaje fijo de ac.
6. Inversores controlados; convierten un voltaje fijo de dc en un voltaje variable de ac.
7. Cicloinversores; convierten una frecuencia fija de ac en una frecuencia variable y voltaje variable de ac.

III.2. RECTIFICADORES CONTROLADOS

Los rectificadores controlados forman la gran mayoría de los convertidores que utilizan semiconductores de potencia. Estos son usados para variar el valor promedio, del voltaje directo aplicado en un circuito de carga. Los tiristores se introducen entre el circuito de carga y la fuente de voltaje de alterna. Para este propósito, el tiristor es controlado por fase.

Algunas de las aplicaciones más comunes de los rectificadores controlados son:

1. Sistemas de control de velocidad, en motores de corriente directa.
2. En procesos electroquímicos o electrometalurgias.
3. En fuentes de poder magnéticas.
4. Convertidores a la entrada de líneas de transmisión de corriente directa.

Tal como los convertidores de voltaje de a.c., los rectificadores controlados pueden ser utilizados en sistemas de control de lazo cerrado cuya función es de

amplificadores operacionales de alta potencia, en donde el ángulo en que los tiristores son disparados (ganancia del amplificador) varía en respuesta a una señal de error (como el caso de nuestro horno). En general, para rectificadores de potencias bajas (hasta 2KW) se recomiendan las fuentes monofásicas de corriente alterna; para potencias más altas, son recomendadas las fuentes trifásicas.

III.2.a) TIPOS DE RECTIFICADORES CONTROLADOS

El tipo de convertidor depende de la potencia necesaria y del porcentaje de rizado de tensión tolerado. Para potencias bajas son adecuados los circuitos monofásicos, los cuales pueden adoptar diferentes formas. La Figura III.6. muestra las posibles configuraciones de rectificadores monofásicos no controlados. En el caso de media onda de la Figura III.6.(a), cuando el suministro de alterna es positivo, en el punto marcado en la figura, el diodo D tiene virtualmente impedancia cero y toda la tensión de la red o de la alimentación aparece como tensión continua variable, entre los terminales de la carga, R_{carga} . Cuando el punto se hace negativo, en el segundo semiciclo, el diodo bloquea la corriente y se comporta como una impedancia infinita, por lo que aparece toda la tensión de la red entre las terminales del diodo y queda aplicada una tensión nula entre las terminales de la carga. En los otros casos representados los diodos actúan de la misma manera, pero están dispuestos de modo que se hace un mejor uso de la tensión disponible. Cuando el punto es positivo conduce D_1 y cuando es negativo, en el otro semiciclo, conduce D_2 . Las formas de onda de la tensión son las representadas en la Figura III.7.

Para potencias más altas, las disposiciones de puente se pueden aplicar a una red trifásica o a una toma polifásica central. El rizo de la tensión se reduce también mucho en magnitud y aumenta en frecuencia. El circuito puede ser de media onda, de puente de onda completa, de toma central o incluso de doble estrella, como en

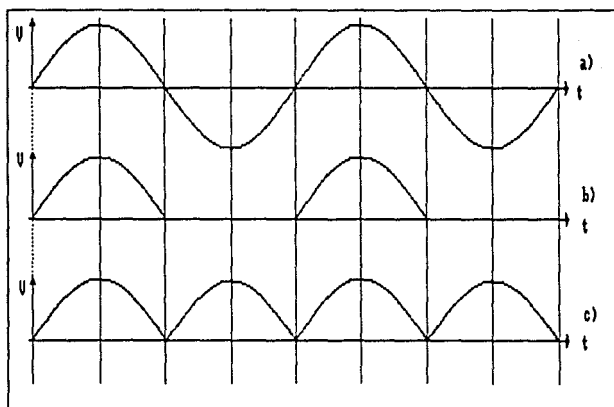
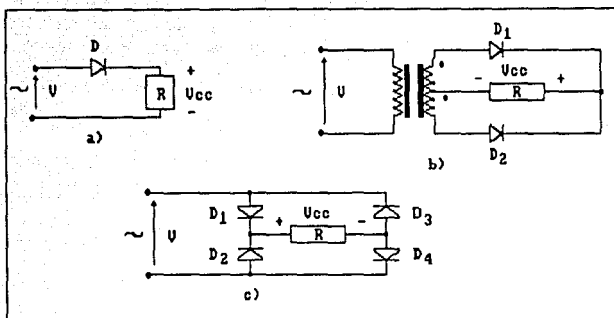


Fig. III.7. Ondas de tensión del rectificador: (a) tensión de suministro; (b) tensión de salida de media onda, y (c) tensión de salida con toma central o de puente; onda completa.

la Figura III.8., con las formas de onda de la Figura III.9. Todos estos rectificadores no controlados dan una tensión continua de salida de valor medio constante.

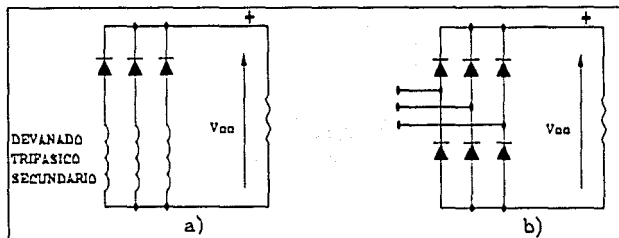


Fig.III.8. Circuitos de rectificador trifásico: (a) media onda; (b) puente de onda completa.

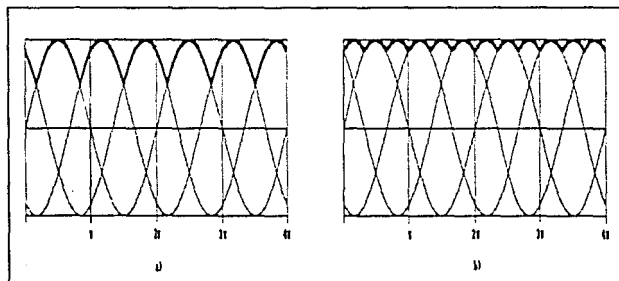


Fig.III.9. Ondas de tensión de salida de los circuitos de la Fig.III.8.

La sustitución de alguno o de todos los diodos, por tiristores, hace posible ajustar la tensión de salida. El método de ajuste es por control de fase y el método de conmutación del tiristor es la conmutación natural. Cada tiristor está sometido a la tensión alterna de la red, por lo que su polarización se invierte cada semiciclo y se bloquea. Los circuitos básicos, con alguna de las formas de onda, están representados en la Figura III.10.

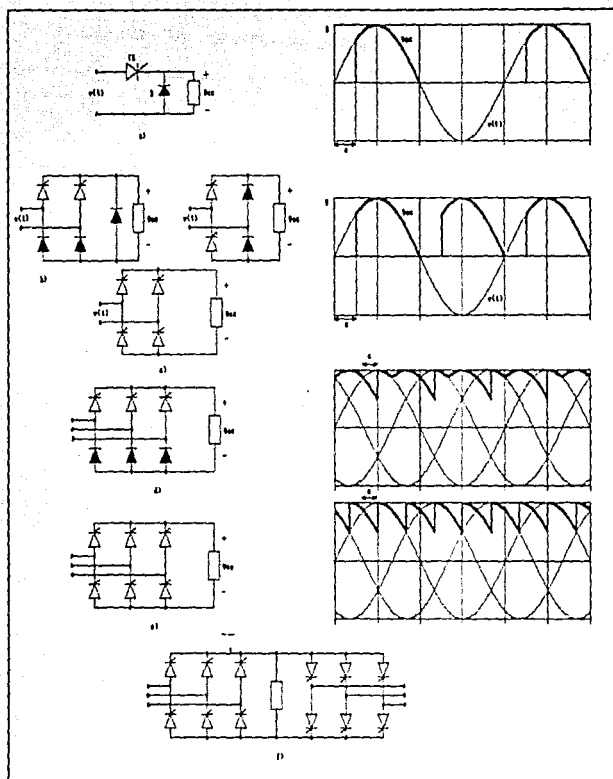


Fig.III.10. Disposiciones de convertidor controlado: (a) media onda controlada; (b) puente monofásico de onda completa, semicontrolado; (c) puente monofásico de onda completa, totalmente controlado; (d) puente trifásico de onda completa, semicontrolado; (e) puente trifásico de onda completa, totalmente controlado, y (f) doble puente de onda completa, totalmente controlado.

III.3. RECTIFICADORES DE TRES FASES.

A continuación analizaremos algunos de los rectificadores controlados trifásicos.

III.3.a) COMPORTAMIENTO DEL RECTIFICADOR TRIFASICO DE ONDA COMPLETA.

A continuación se explica el funcionamiento del rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado, cuyo diagrama se presenta en la Figura III.11.

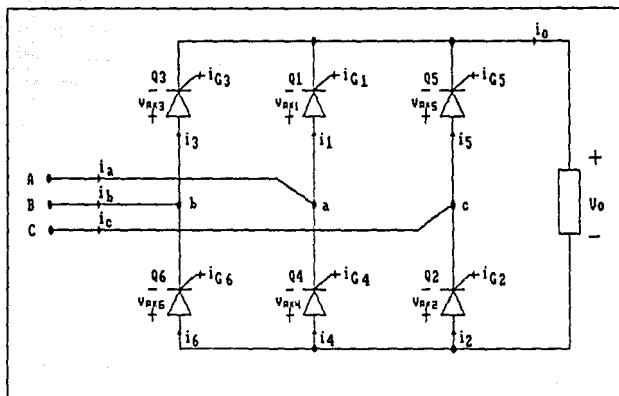


Fig.III.11 Diagrama del circuito rectificador trifásico controlado, de onda completa.

Las señales de voltaje de fase y de corriente en la carga se muestran en la Figura III.12. Las corrientes en los tiristores que generan la corriente en la carga i_o , se indican directamente sobre la curva de i_o . La corriente fluirá en la fase A siempre que el voltaje de línea a línea aplicado en la carga sea V_{ab}, V_{ac}, V_{ba} o V_{ca} ; esto es, durante dos tercios del ciclo. La corriente en la fase A se muestra en la Figura III.12. con i_a . El aspecto de las formas de onda de la corriente de fase es similar a las otras dos fases, con un corrimiento de fase de $\pm 120^\circ$.

Si el pulso de la corriente de gate lo hacemos lo suficientemente estrecho (prácticamente en el punto de corriente cero en la carga) y si sabemos que cualquier reducción de α afecta a la corriente en la carga (i_o), entonces para que se cumpla esto ($i_o=0$), el tiristor tendría que ser puesto en ON justo en el instante en que el voltaje aplicado a éste se torna negativo. Si observamos la figura III.12. en $\omega t = \pi$, el voltaje v_{ab} empieza a ser negativo. Si consideramos que $\alpha = 2\pi/3$, la reducción de α por debajo de este valor implica que los tiristores Q_1 y Q_6 están en conducción (el de entrada y retorno de la corriente), por lo que la señal de gate tiene que estar presente en los dos tiristores en ese instante ($\omega t = \pi$). Esto fija el momento de fin del pulso i_{G6} y el momento de inicio de i_{G1} . El punto inicial y el punto final, de los demás pulsos de gate para las mismas condiciones, se pueden analizar de la misma manera, de tal forma que para el ángulo máximo de retraso que nos da una corriente de cero en la carga, las señales de gate resultantes se representan por las áreas sombreadas de los pulsos rectangulares de i_{G1} hasta i_{G6} en la Figura III.12. Cualquier incremento en la corriente nos lleva a que se extiendan hacia la izquierda estas señales de gate. Si no existieran estas áreas sombreadas de los pulsos, entonces, sobre el rango de $\pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3$, sólo un tiristor sería puesto en conducción, por lo que no fluiría corriente por la carga.

Las siguientes fórmulas representan la forma de calcular V_0 (Voltaje Promedio) e I_0 (Corriente Promedio) así como V_{rms} e I_{rms} (Voltaje y Corriente RMS).

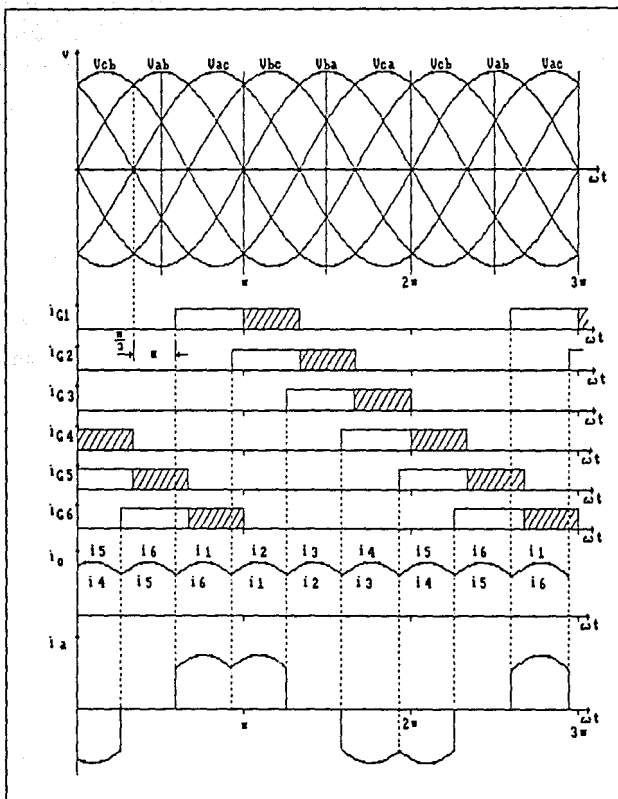


Fig.III.12 . Señales de voltaje y corriente, en el circuito rectificador trifásico controlado de onda completa.

Fórmulas:

Del análisis anterior podemos ver que cada tiristor conducirá durante dos de los seis pulsos de corriente por lo que la corriente promedio en cada tiristor será:

$$I_O = \frac{I_0}{3} \quad [\text{A}]$$

la corriente RMS en cada tiristor será:

$$I_{Orms} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}]$$

La corriente, entre fases de la fuente de voltaje, fluirá durante cuatro de los seis pulsos que ocurren en cada ciclo, por lo que la corriente RMS de línea (I_F) será:

$$I_F = \sqrt{2} I_{Orms} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{rms} \quad [\text{A}]$$

La potencia S (potencia suministrada) estará dada por:

$$S = \sqrt{3} V I_F = \sqrt{2} V I_{rms} \quad [\text{VA}]$$

III.3.b. COMPORTAMIENTO DEL RECTIFICADOR SEMICONVERTIDOR

El circuito rectificador semicontrolado se puede observar en la Figura III.13. Para explicar su funcionamiento atenderemos a las gráficas de la Figura III.14., en donde, en primer término, se observan las ondas de la señal trifásica de alimenta-

ción, cuyos tres voltajes entre fases están identificados como V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} . En la parte baja de la gráfica se observan los pulsos de disparo correspondientes a cada tiristor, teniendo en cuenta que estos pulsos varían de derecha a izquierda, según el ángulo de conducción requerido. En la gráfica se representa el área total en la que pueden variar, desde 180° a 0° . Se dividió en seis partes; esto es, cada 30° , para fines de la explicación.

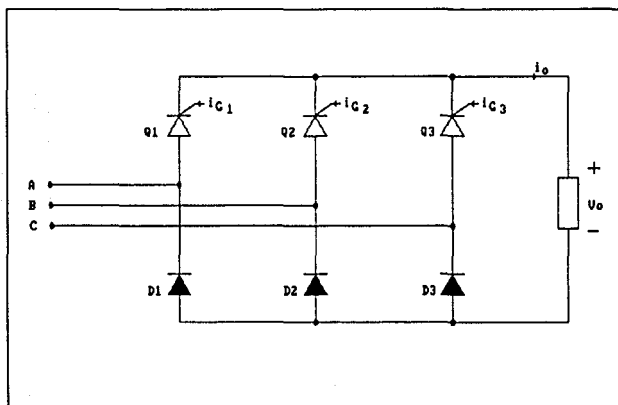


Fig.III.13. Circuito rectificador trifásico semiconvertidor.

Analizaremos ahora el comportamiento del tiristor Q_2 , cuyo pulso de disparo es I_{G2} y abarca desde π a 2π .

Si nuestro disparo comienza en cualquier punto del área I y II, tenemos que la fase $C > B > A$. Ahora bien, como el tiristor Q_2 que estamos disparando está conectado a la fase B y el voltaje más negativo está en la fase A, observamos que la corriente fluirá a través de Q_2 y regresará por D_1 , teniendo en la carga el voltaje

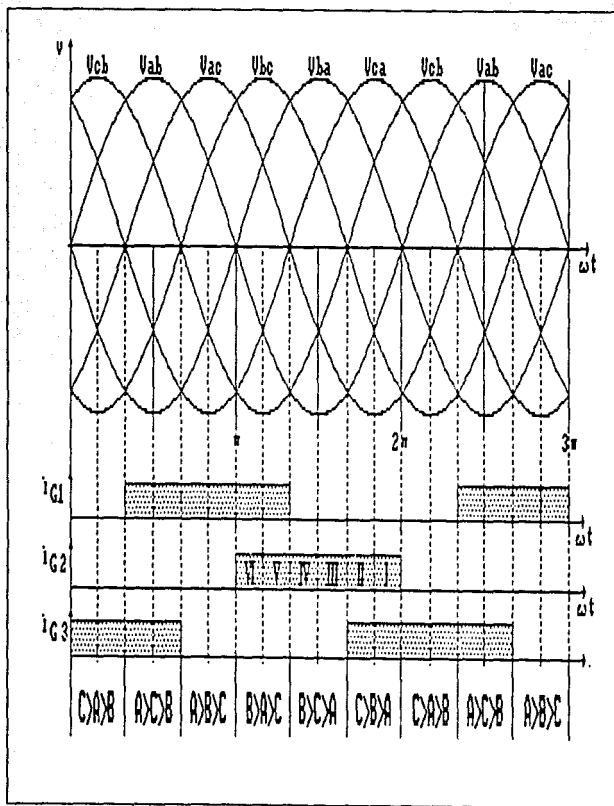


Fig.III.14 . Señales de voltaje y corriente en el circuito rectificador trifásico semicentra-
do de onda completa.

VBA, que es la rectificación del lóbulo negativo de la fase V_{AB} (Ver anexo 1, gráfica 1).

En el área III Y IV tenemos que la fase $B > C > A$. Como seguimos disparando a Q₂, se observa un comportamiento idéntico al caso anterior (Ver anexo 1, gráfica 2).

En el area V y VI, tenemos que la fase $B > A > C$. Aquí observamos que se traslapan dos pulsos de disparo; esto es que se activan dos tiristores (en este caso, serían Q₁ y Q₂). El regreso de la corriente es por D₃, por ser la fase C la más negativa en ese momento. Como la fase $B > A$, el tiristor que conducirá corriente será Q₂, ya que para Q₁ no se cumplen los condiciones de conducción para un tiristor; por consiguiente, el voltaje en la carga sera V_{BC} (ver anexo 1, gráfica 3). El cálculo de los parámetros de voltaje y de corriente es el mismo que en el caso del rectificador trifásico de onda completa.

III.4. SELECCION DEL CIRCUITO DE POTENCIA.

Por razones de facilidad y economía, se decidió que la potencia suministrada al horno fuera controlada a través de un rectificador semicontrolado. Debido a que este circuito utiliza únicamente tres tiristores en lugar de seis, como en el rectificador controlado de onda completa, por un lado tenemos un ahorro económico y por el otro una simplificación, en el circuito de disparo o generador de pulso de disparo para los tiristores, ya que únicamente tenemos que generar tres pulsos. Los cálculos teóricos de los parámetros más importantes del sistema de potencia, como voltajes, corriente y potencia para distintos ángulos de conducción, se presentan en el anexo 2 de este capítulo.

III.5. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CIRCUITO DE DISPARO DE LOS TIRISTORES A UTILIZAR.

El circuito de disparo provee la señal necesaria entre compuerta y cátodo del tiristor, para activarlo. El requisito es que la tensión de compuerta tenga un valor que sea capaz de originar una corriente mínima de disparo. Con tiristores de alta potencia, son necesarias corrientes intensas de gate. Las características de voltaje y corriente de compuerta, especificadas por el fabricante, deben estar incluidas en el área sombreada de la Figura III.15. Esta figura muestra que hay valores mínimos de voltaje y de corriente de compuerta, por debajo de los cuales el tiristor no se activara.

También hay límites máximos, establecidos para la señal de compuerta. Una señal que exceda de este límite, puede producir deterioro. Las señales comprendidas en el área sombreada dispararán siempre al tiristor.

El control de fase es una manera usual de alterar la potencia de la corriente alterna suministrada a una carga. La potencia se regula variando la parte del ciclo de voltaje durante la cual puede circular la corriente. Esto significa que el impulso

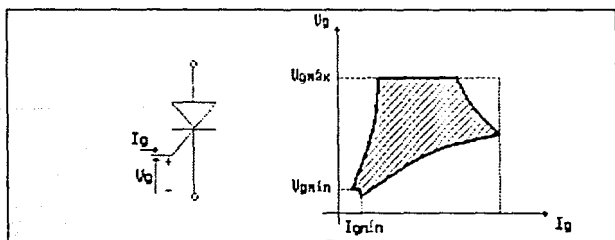


Fig.III.15. Características de voltaje y corriente de compuerta de un tiristor.

que conecta al tiristor, en el momento correcto del ciclo, está sincronizado con el suministro de alterna y su fase respecto al voltaje de alimentación está regulada.

El circuito de precisión que forma parte del trabajo práctico desarrollado para esta tesis y que se diseñó y construyó específicamente para obtener un ángulo de conducción deseado, se representa en el diagrama de bloques de la Figura III.16. La fuente de c.a. suministra la señal sincronizada que es convertida a una forma de onda cuadrada, la que, a su vez, se transforma en una señal de diente de sierra al pasar por un circuito generador de rampa (fuente de corriente), esta señal posteriormente se compara con un voltaje de referencia variable, el cual determina el ángulo de conducción de los tiristores, para que por último, un multivibrador se encargue de modular la salida en alta frecuencia (generador de pulsos) de tal forma que la señal pueda pasar a través de un transformador que aisle el circuito de disparo y el circuito de potencia.

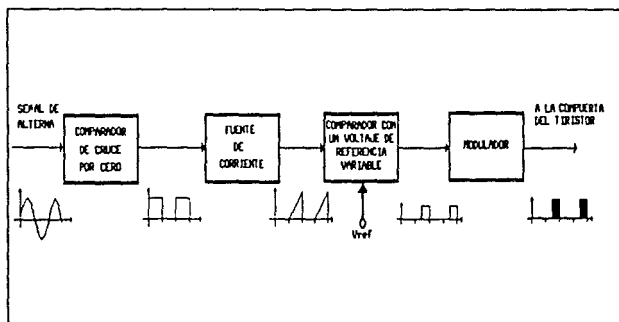


Fig.III.16. Diagrama de bloques del circuito de disparo.

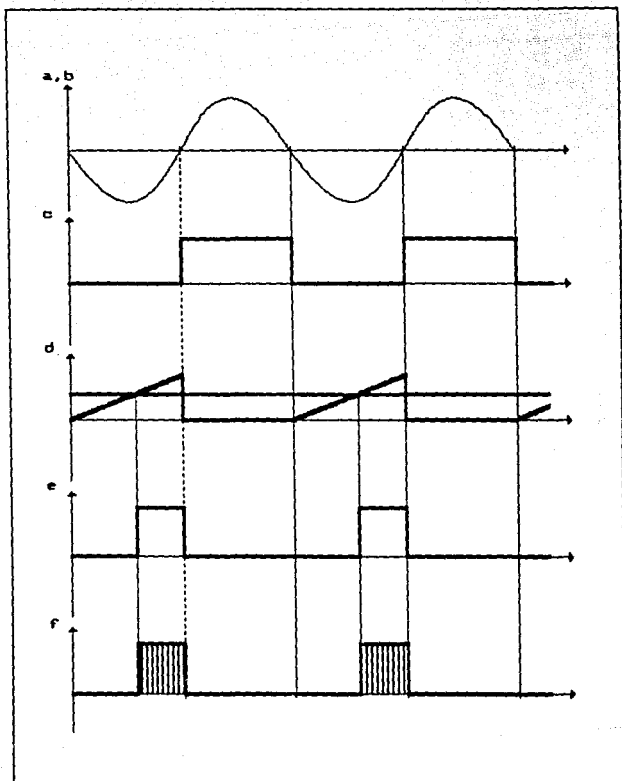


Fig.III.18. Gráficas del comportamiento del circuito de disparo.

III.5.a) CALCULO Y FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE DISPARO.

A continuación se analiza detalladamente cada etapa de nuestro circuito de disparo.

1. Bloque de transformadores de línea.

Se tiene un sistema trifásico balanceado, conectado en delta en el primario y en estrella en el secundario. El voltaje de línea es de 220V, que por medio de transformadores se reduce a 5V en el secundario. La Figura III.19. nos muestra detalladamente este bloque.

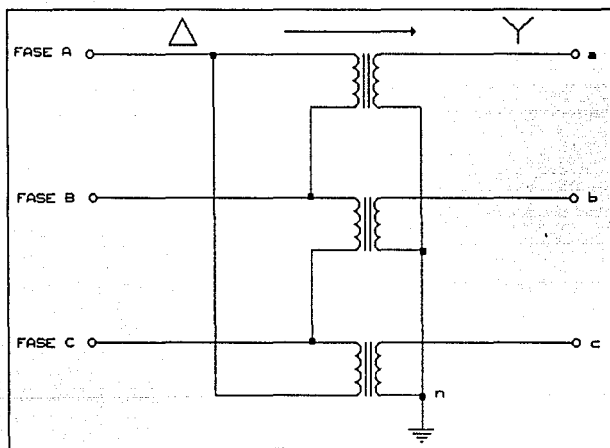


Fig.III.19. Circuito de transformadores.

2. Bloque detector de cruce por cero.

La salida de los transformadores es una onda senoidal de 5V. Esta señal entrará al detector de cruce por cero. Por facilidad, a partir de este momento se hará el análisis para una sola fase. El amplificador operacional LM324 se utilizó como circuito comparador para la detección de cruce por cero (ver Figura III.20.). Si el circuito detecta un voltaje de entrada positivo, tendrá a su salida un voltaje constante positivo, que será determinado por la fuente de alimentación y por el arreglo de resistencias. En caso de que el voltaje de entrada sea menor o igual a cero, su salida será de cero volts. La salida será una señal cuadrada, de frecuencia constante.

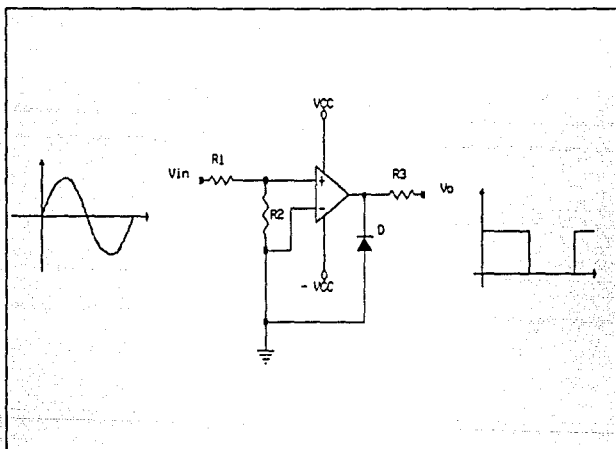


FIG.III.20. Circuito detector de cruce por cero.

3. Generador de rampa.

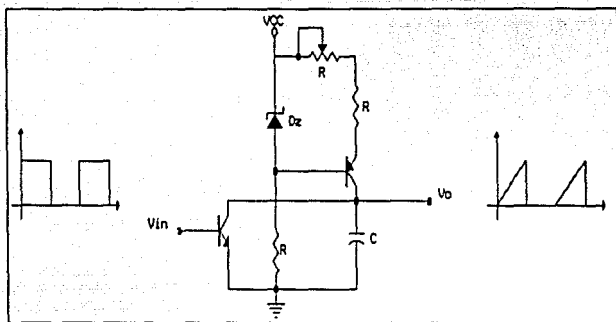


Fig.III.21. Circuito generador de rampa.

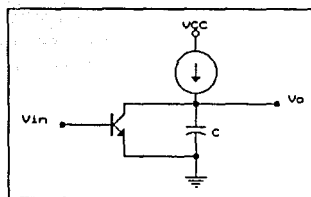


Fig.III.22. Representación esquemática del circuito.

La onda de pulsos que se obtiene en el detector de cruce por cero será la entrada al generador de rampa, como se aprecia en la Figura III.21. Este consiste en un circuito generador de rampa, cuya representación esquemática se muestra en la Figura III.22.

4. Comparador de voltaje.

La rampa generada anteriormente, será la señal de entrada que se comparará con un voltaje de referencia (V_r), proporcionado por la tarjeta del circuito digital

("cerebro del sistema"). Este voltaje de referencia varía de 0 a 5 volts, originando una salida de ancho de pulso variable.

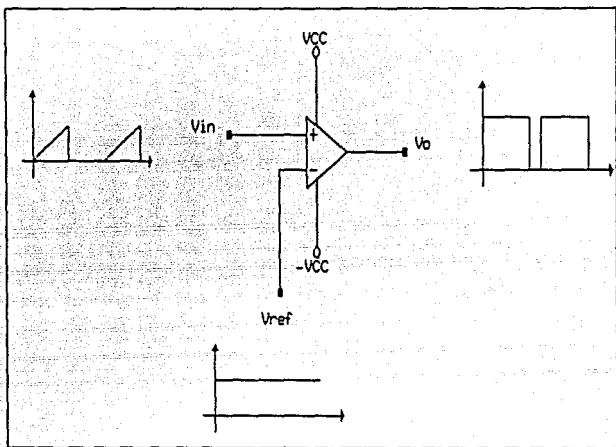


Fig.III.23. Circuito comparador de voltaje.

Donde si:

$V_{in} = V_r = 0V$ entonces $V_o = 0 V$

$V_{in} > V_r$ " $V_o = V_{sat} = 15 V$

$V_{in} < V_r$ " $V_o = 0 V$

$V_{in} = V_r = 5 V$ " Se tendrá la mínima apertura del pulso.

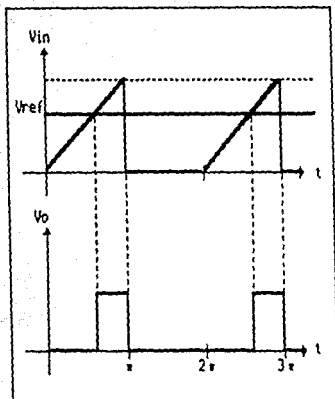


Fig.III.24. Gráficas de las señales de entrada y salida.

Esto se puede apreciar en la gráfica de la Figura III.24., observando que, dependiendo del valor de V_r , será el ancho del pulso que determinará el ángulo de conducción de los tiristores:

- Si V_r es pequeño, la abertura del pulso es grande, causando que el tiristor conduzca por más tiempo.

- Si V_r es grande, la abertura del pulso es pequeña, causando que el tiristor conduzca en menos tiempo.

Esto generará que se regule la corriente que pasa a la resistencia del horno y se controle la temperatura de éste.

5. Aislador entre los circuitos de disparo y potencia.

La corriente de pulso, requerida para disparar un tiristor, es típicamente de 100 a 400 mA y el tiempo de duración (t_p) debe de ser por lo menos de 5ms.

La potencia de la electrónica de disparo se aísla a través de un transformador de pulsos. Para poder transmitir la señal de disparo por medio de este se le modula a una frecuencia alta (en nuestro caso, es de 10 kHz) y esto se logra por medio de un timer (LM555), como puede verse en la Figura III.25. La señal de disparo se envía a un transistor Darlington TIP-110, que proporciona la corriente requerida.

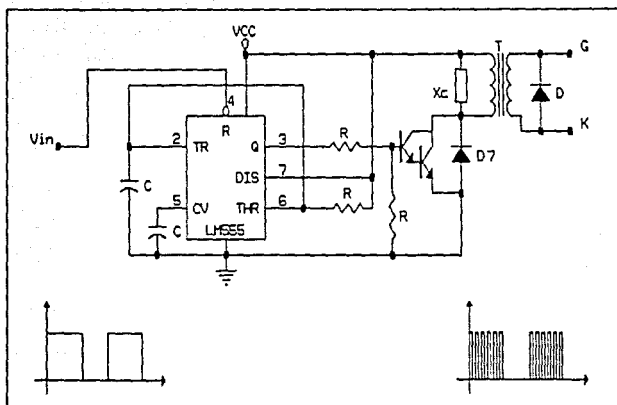


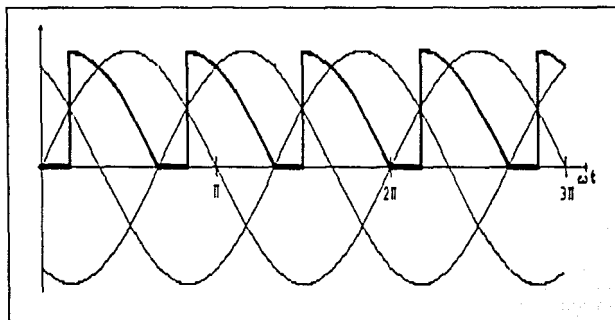
Fig.III.25. Circuito modulador y aislador.

El diodo D7 se conecta, para evitar el posible arco que se genere al regresar a cero la señal de cada pulso que switchea a 10 kHz.

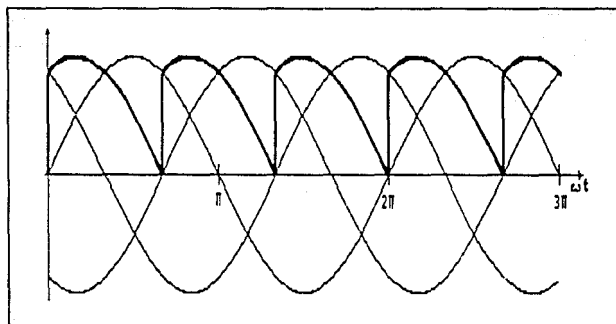
Esta señal llega a un transformador diseñado específicamente para que trabaje a 10 kHz y que tiene un circuito de amortiguamiento para que, en caso de que se presente una señal transitoria, ésta sea eliminada y no afecte a la corriente de la compuerta, provocando que pueda llegar a quemarse el tiristor. En el anexo 3, se presenta el diagrama que muestra el seguimiento de todo el circuito de potencia descrito a lo largo de este capítulo.

ANEXO 1

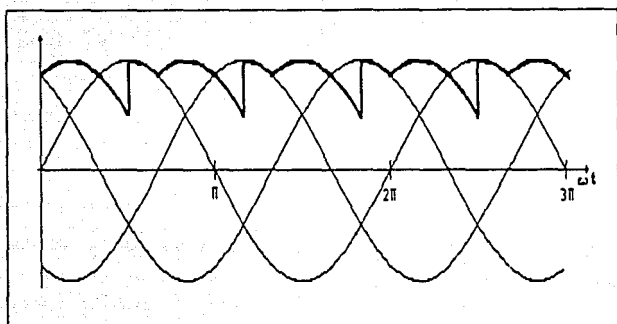
GRAFICAS DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL CIRCUITO DE POTENCIA



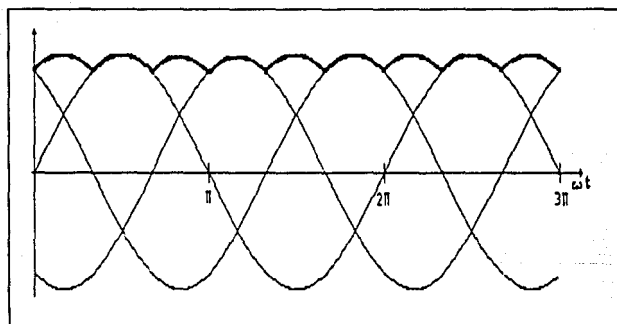
GRAFICA 1



GRAFICA 2



GRAFICA 3



GRAFICA 4

III-B

A NEXO 2

A continuación se presentan los cálculos de voltajes, corrientes y potencia del circuito de potencia del horno, para ángulos de conducción de 90°, 120°, 150° y 180°.

El período :

$$T = 2 \cdot \pi$$

El voltaje de la fuente trifásica es:

$$V = 110 \text{ V}_{\text{rms}}$$

La resistencia del horno tiene un valor de:

$$R = 14 \Omega$$

El voltaje promedio se calcula por la fórmula:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t) \, d\omega t \quad (1)$$

El voltaje rms lo calculamos con la formula:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sqrt{2} \cdot 110 \cdot \sin(\omega t) \right]^2 \, d\omega t} \quad (2)$$

La corriente promedio y corriente rms se calculan por:

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (3)$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R} \quad (4)$$

La potencia rms del sistema se calcula con:

$$P = V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (5)$$

Aplicando las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), respectivamente para cada ángulo de conducción, tendremos:

Para un ángulo de conducción de 90°:

$$U_o = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2 \cdot 110} \cdot \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right] d\omega t$$

$$U_o = 74.276 \quad \text{V}$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}} \left[\sqrt{2 \cdot 110} \cdot \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right] \right]^2 d\omega t}$$

$$U_{rms} = 95.263 \quad \text{V}$$

$$I_o = \frac{74.276}{14} \quad I_{rms} = \frac{95.263}{14}$$

$$I_o = 5.305 \quad \text{A} \quad I_{rms} = 6.805 \quad \text{A}$$

$$P = 95.263 \cdot 6.805$$

$$P = 648.265 \quad \text{W}$$

Para un ángulo de conducción de 120° , tendremos:

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 110 \cdot \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right] d\omega t$$

$$V_0 = 111.414 \quad \text{V}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_0^{2\pi} \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 110 \cdot \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right] \right]^2 d\omega t}$$

$$V_{rms} = 120.837 \quad \text{V}$$

$$I_0 = \frac{111.414}{14}$$

$$I_{rms} = \frac{120.837}{14}$$

$$I_0 = 7.958 \quad \text{A}$$

$$I_{rms} = 8.631 \quad \text{A}$$

$$P = 120.837 \cdot 8.631$$

$$P = 1.043 \quad \text{KW}$$

Para un ángulo de conducción de 150° , tendremos:

$$U_o = \frac{3}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2 \cdot 110 \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right]} d\omega t + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{2}} \sqrt{2 \cdot 110 \sin(\omega t)} d\omega t \right]$$

$$U_o = 138.601 \text{ V}$$

$$U_{rms} = \frac{3}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3}} \left[\sqrt{2 \cdot 110 \sin \left[\omega t + \frac{\pi}{3} \right]} \right]^2 d\omega t + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{2}} \left[\sqrt{2 \cdot 110 \sin(\omega t)} \right]^2 d\omega t \right]$$

$$U_{rms} = 140.018 \text{ V}$$

$$I_o = \frac{138.601}{14}$$

$$I_o = 9.9 \text{ A}$$

$$P = 140.601 \text{ W}$$

$$P = 1.968 \text{ kW}$$

$$I_{rms} = \frac{140.601}{14}$$

$$I_{rms} = 10.043 \text{ A}$$

Para un ángulo de conducción de 180° , tendremos:

$$U_o = \frac{6}{\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{3}} \int_0^\pi \sqrt{2 \cdot 110 \cdot \sin(\omega t)} d\omega t$$

$$U_o = 148.552 \text{ V}$$

$$U_{rms} = \frac{6}{\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{3}} \sqrt{\int_0^\pi [2 \cdot 110 \cdot \sin(\omega t)]^2 d\omega t}$$

$$U_{rms} = 148.683 \text{ V}$$

$$I_o = \frac{148.552}{14} \quad I_{rms} = \frac{148.683}{14}$$

$$I_o = 10.611 \text{ A} \quad I_{rms} = 10.62 \text{ A}$$

$$P = 148.683 \cdot 10.62$$

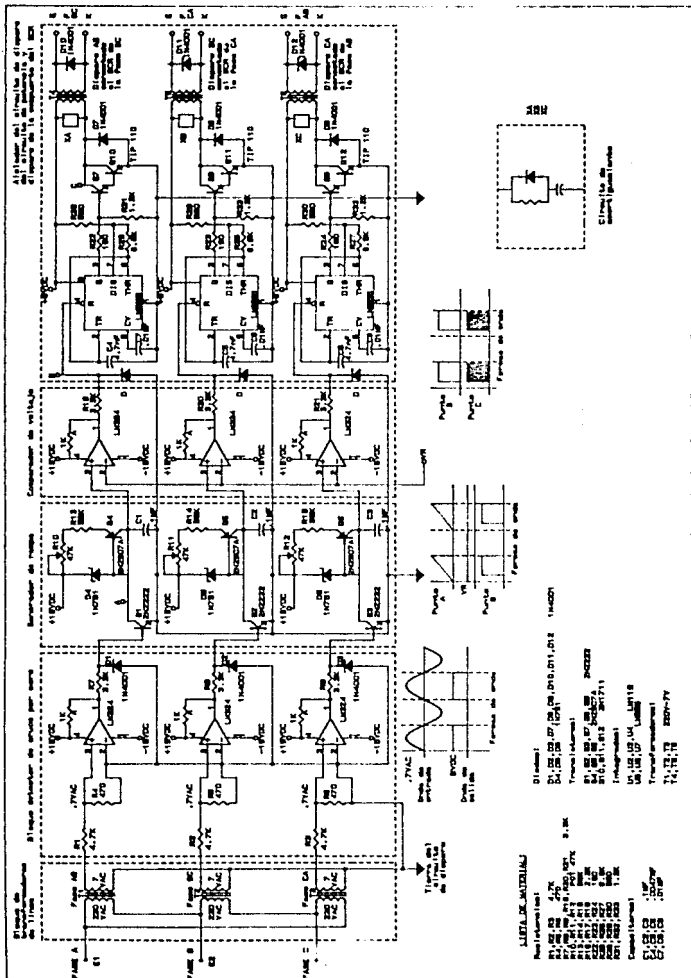
$$P = 1.579 \text{ KW}$$

ANEXO 3

DIAGRAMA ELECTRICO DEL CIRCUITO DE DISPARO

III-H

DIAGRAMA ELECTRICO DEL CIRCUITO DE DISPARO



- LISTA DE MATERIALES
- Resistencia (ohm):
- R1, R2, R3 20K
 - R4, R5, R6 10K
 - R7, R8, R9 10K
 - R10, R11, R12 10K
 - R13, R14, R15 10K
 - R16, R17, R18 10K
 - R19, R20, R21 10K
 - R22, R23, R24 10K
 - R25, R26, R27 10K
 - R28, R29, R30 10K
 - R31, R32, R33 10K
 - R34, R35, R36 10K
 - R37, R38, R39 10K
 - R40, R41, R42 10K
 - R43, R44, R45 10K
 - R46, R47, R48 10K
 - R49, R50, R51 10K
 - R52, R53, R54 10K
 - R55, R56, R57 10K
 - R58, R59, R60 10K
 - R61, R62, R63 10K
 - R64, R65, R66 10K
 - R67, R68, R69 10K
 - R70, R71, R72 10K
 - R73, R74, R75 10K
 - R76, R77, R78 10K
 - R79, R80, R81 10K
 - R82, R83, R84 10K
 - R85, R86, R87 10K
 - R88, R89, R90 10K
 - R91, R92, R93 10K
 - R94, R95, R96 10K
 - R97, R98, R99 10K
 - R100, R101, R102 10K
- Capacitor (microfarad):
- C1, C2, C3 100µF
 - C4, C5, C6 10µF
 - C7, C8, C9 10µF
 - C10, C11, C12 10µF
 - C13, C14, C15 10µF
 - C16, C17, C18 10µF
 - C19, C20, C21 10µF
 - C22, C23, C24 10µF
 - C25, C26, C27 10µF
 - C28, C29, C30 10µF
 - C31, C32, C33 10µF
 - C34, C35, C36 10µF
 - C37, C38, C39 10µF
 - C40, C41, C42 10µF
 - C43, C44, C45 10µF
 - C46, C47, C48 10µF
 - C49, C50, C51 10µF
 - C52, C53, C54 10µF
 - C55, C56, C57 10µF
 - C58, C59, C60 10µF
 - C61, C62, C63 10µF
 - C64, C65, C66 10µF
 - C67, C68, C69 10µF
 - C70, C71, C72 10µF
 - C73, C74, C75 10µF
 - C76, C77, C78 10µF
 - C79, C80, C81 10µF
 - C82, C83, C84 10µF
 - C85, C86, C87 10µF
 - C88, C89, C90 10µF
 - C91, C92, C93 10µF
 - C94, C95, C96 10µF
 - C97, C98, C99 10µF
 - C100, C101, C102 10µF
- Diode (volts):
- D1, D2, D3 1N4007
 - D4, D5, D6 1N4007
 - D7, D8, D9 1N4007
 - D10, D11, D12 1N4007
 - D13, D14, D15 1N4007
 - D16, D17, D18 1N4007
 - D19, D20, D21 1N4007
 - D22, D23, D24 1N4007
 - D25, D26, D27 1N4007
 - D28, D29, D30 1N4007
 - D31, D32, D33 1N4007
 - D34, D35, D36 1N4007
 - D37, D38, D39 1N4007
 - D40, D41, D42 1N4007
 - D43, D44, D45 1N4007
 - D46, D47, D48 1N4007
 - D49, D50, D51 1N4007
 - D52, D53, D54 1N4007
 - D55, D56, D57 1N4007
 - D58, D59, D60 1N4007
 - D61, D62, D63 1N4007
 - D64, D65, D66 1N4007
 - D67, D68, D69 1N4007
 - D70, D71, D72 1N4007
 - D73, D74, D75 1N4007
 - D76, D77, D78 1N4007
 - D79, D80, D81 1N4007
 - D82, D83, D84 1N4007
 - D85, D86, D87 1N4007
 - D88, D89, D90 1N4007
 - D91, D92, D93 1N4007
 - D94, D95, D96 1N4007
 - D97, D98, D99 1N4007
 - D100, D101, D102 1N4007
- Transistor (volts):
- Q1, Q2, Q3 TIP-110
 - Q4, Q5, Q6 TIP-110
 - Q7, Q8, Q9 TIP-110
 - Q10, Q11, Q12 TIP-110
 - Q13, Q14, Q15 TIP-110
 - Q16, Q17, Q18 TIP-110
 - Q19, Q20, Q21 TIP-110
 - Q22, Q23, Q24 TIP-110
 - Q25, Q26, Q27 TIP-110
 - Q28, Q29, Q30 TIP-110
 - Q31, Q32, Q33 TIP-110
 - Q34, Q35, Q36 TIP-110
 - Q37, Q38, Q39 TIP-110
 - Q40, Q41, Q42 TIP-110
 - Q43, Q44, Q45 TIP-110
 - Q46, Q47, Q48 TIP-110
 - Q49, Q50, Q51 TIP-110
 - Q52, Q53, Q54 TIP-110
 - Q55, Q56, Q57 TIP-110
 - Q58, Q59, Q60 TIP-110
 - Q61, Q62, Q63 TIP-110
 - Q64, Q65, Q66 TIP-110
 - Q67, Q68, Q69 TIP-110
 - Q70, Q71, Q72 TIP-110
 - Q73, Q74, Q75 TIP-110
 - Q76, Q77, Q78 TIP-110
 - Q79, Q80, Q81 TIP-110
 - Q82, Q83, Q84 TIP-110
 - Q85, Q86, Q87 TIP-110
 - Q88, Q89, Q90 TIP-110
 - Q91, Q92, Q93 TIP-110
 - Q94, Q95, Q96 TIP-110
 - Q97, Q98, Q99 TIP-110
 - Q100, Q101, Q102 TIP-110
- Operational Amplifier (volts):
- U1, U2, U3 LM741
 - U4, U5, U6 LM741
 - U7, U8, U9 LM741
 - U10, U11, U12 LM741
 - U13, U14, U15 LM741
 - U16, U17, U18 LM741
 - U19, U20, U21 LM741
 - U22, U23, U24 LM741
 - U25, U26, U27 LM741
 - U28, U29, U30 LM741
 - U31, U32, U33 LM741
 - U34, U35, U36 LM741
 - U37, U38, U39 LM741
 - U40, U41, U42 LM741
 - U43, U44, U45 LM741
 - U46, U47, U48 LM741
 - U49, U50, U51 LM741
 - U52, U53, U54 LM741
 - U55, U56, U57 LM741
 - U58, U59, U60 LM741
 - U61, U62, U63 LM741
 - U64, U65, U66 LM741
 - U67, U68, U69 LM741
 - U70, U71, U72 LM741
 - U73, U74, U75 LM741
 - U76, U77, U78 LM741
 - U79, U80, U81 LM741
 - U82, U83, U84 LM741
 - U85, U86, U87 LM741
 - U88, U89, U90 LM741
 - U91, U92, U93 LM741
 - U94, U95, U96 LM741
 - U97, U98, U99 LM741
 - U100, U101, U102 LM741

CAPITULO IV

SISTEMA DIGITAL

SISTEMA DIGITAL

En este capítulo presentamos el desarrollo de la parte digital de nuestro proyecto, mostrando diferentes aspectos del hardware y del software.

El Hardware está hecho en base al microprocesador 6802 de motorola; por ser uno de los más usados en el desarrollo de proyectos en el metro; y además, por sus características, que se detallarán posteriormente.

La última parte del capítulo se refiere al software, es decir, al programa que se encarga de controlar al sistema digital, tema de este trabajo. El objetivo de éste es el de administrar todos los recursos de nuestro sistema, en la forma más eficiente que sea posible. El primer punto considerado es el de programar todos los periféricos, como son los puertos de E/S (Entrada/Salida) y el timer. El siguiente punto es el programa de control del horno, en donde se consideran las condiciones de operación del sistema completo.

IV.1. DESCRIPCION DEL SISTEMA.

El sistema digital es el cerebro controlador del horno. Este se encarga de procesar las señales provenientes de los circuitos de instrumentación, que proporcionan información de la temperatura y de la corriente consumida por el horno. En base al análisis de estas señales, toma una decisión en la cantidad de potencia suministrada al sistema. El algoritmo que se encarga de efectuar esta tarea y de tomar los datos necesarios está grabado en una memoria (EPROM 2716), lo que se explica en el último inciso de este capítulo. La temporización necesaria se logra programando un timer (6840) y el contacto entre la circuitería y el micro se logra a través de los puertos de entrada y salida (6821).

En la Figura IV.1 podemos ver el diagrama de bloques básico de nuestro sistema digital, en donde se observa la interacción del microprocesador o CPU con los demás dispositivos, como memoria, puertos, temporizador y lógica de decodificación.

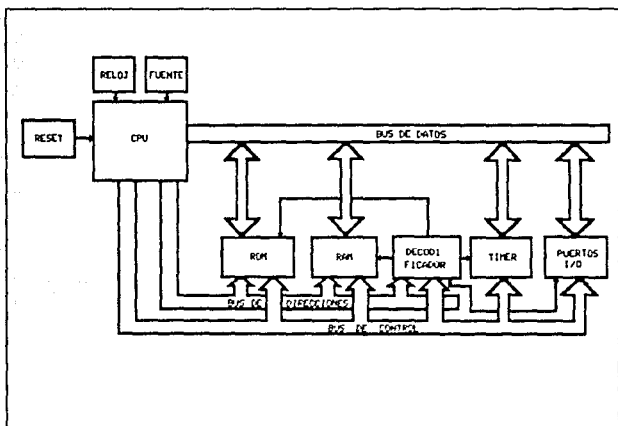


Fig.IV.1 Diagrama de bloques básico del sistema digital.

IV.2. HARDWARE DEL SISTEMA.

La parte central del hardware es el microprocesador. Este, en base a un programa, procesa información y toma decisiones, las cuales se ejecutan con la ayuda de los demás circuitos periféricos.

En nuestro caso, la unidad de procesamiento central la constituye el microprocesador 6802, de motorola.

IV.2.a) MICROPROCESADOR.

En esta sección se presentan los principales aspectos del microprocesador.

La estructura básica del $\mu\text{p}6802$ se muestra en la Figura IV.2. En esta figura podemos observar las partes básicas que lo constituyen, que son: los registros PC (Contador de programa); IX (de indexado); SP (Apuntador de stack); la unidad lógica-aritmética; el registro de banderas; el registro de instrucciones y los acumuladores.

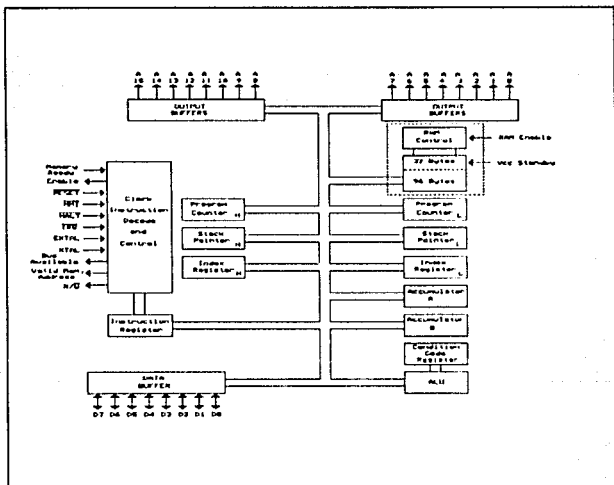


Fig.IV.2. Estructura interna del $\mu\text{p}6802$.

El bus de datos es de 8 bits y el bus de direcciones es de 16 bits, lo que permite acceder 64KB de memoria. Los registros PC, IX y SP son de 16 bits, ya que por lo general su contenido indica una dirección dada.

La principal diferencia del μ p6802 con los demás μ p de 8 bits, es la de tener dos acumuladores. Este hecho es conveniente, ya que dos operaciones aritméticas pueden ser manejadas simultáneamente.

El registro de banderas contiene indicadores para acarreo, cero, número negativo, acarreo medio (entre el bit 3 y 4), sobreflujo e interrupción.

Como se observa en la Figura IV.2., el μ p6802 también contiene internamente una memoria RAM de 128 bytes que ocupa las localidades más bajas de memoria, que son 50000-5007F. Los primeros 32 bytes de esta memoria tienen una polarización separada (V_{cc} stand, pin 35), que se recomienda conectar a una pila independiente capaz de proporcionar 8mA de corriente, a un voltaje de 4 ~ 5.25V. Si llega a fallar la alimentación del sistema, el μ p puede guardar datos vitales en estos 32 bytes.

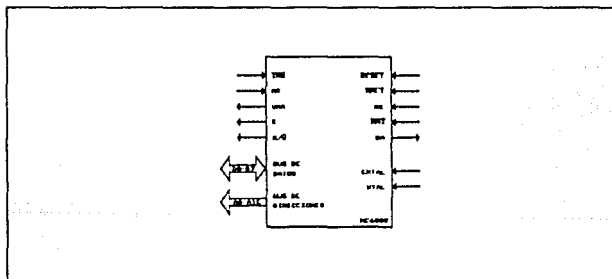


Fig.IV.3. Diagrama de conexiones del μ p6802.

En la Figura IV.3. se muestra el diagrama de bloques, de las conexiones externas del $\mu\text{p}6802$.

A continuación se explican brevemente las señales del μp que se utilizan en nuestro proyecto:

RESET - Señal de entrada activa baja, que reinicializa al sistema. Cuando se

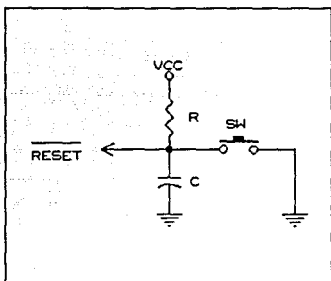


Fig.IV.4. Circuito de reset.

activa esta señal, se pierde toda la información de los registros y el μp buscará las dos últimas localidades de memoria, $\$FFFE$ y $\$FFFF$, donde se encuentra la dirección que inicia el programa monitor (ver Tabla IV.1.). En la Figura IV.4. se muestra el circuito de reset utilizado en el sistema.

RE - Esta señal de entrada habilita el acceso a la memoria RAM interna del μp .

NMI - Señal de entrada activa baja, indica que se requiere una interrupción no mascarable. El contenido de los registros IX, PC y de los acumuladores, se guardan en el stack y a continuación el PC se carga con las direcciones que contienen las localidades de memoria $\$FFFC$ - $\$FFFD$ (ver Tabla IV.1.), causando que el μp ejecute la rutina de interrupción.

XTAL y EXTAL - A estas entradas, se conecta el oscilador de cristal de cuarzo tal como se muestra en la Fig.IV.5.

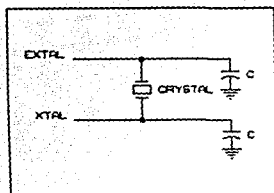


Fig.IV.5. Conexión del oscilador de cuarzo.

IRQ - Entrada activa baja, señal de requerimiento de interrupción mascarable. Esta, únicamente es atendida si la bandera de interrupción está apagada. En este caso, el contenido de los registros IX, PC, de banderas y los acumuladores son guardados en el stack, ejecutando la rutina de interrupción cuya dirección de inicio está guardada en las localidades \$FFF8-\$FFF9 (Ver Tabla IV.1.).

VMA - Esta señal de entrada le indica a los dispositivos periféricos que una dirección válida está presente en el bus de direcciones.

E - Es una señal de salida de reloj, para todos los circuitos periféricos del sistema que lo requieran.

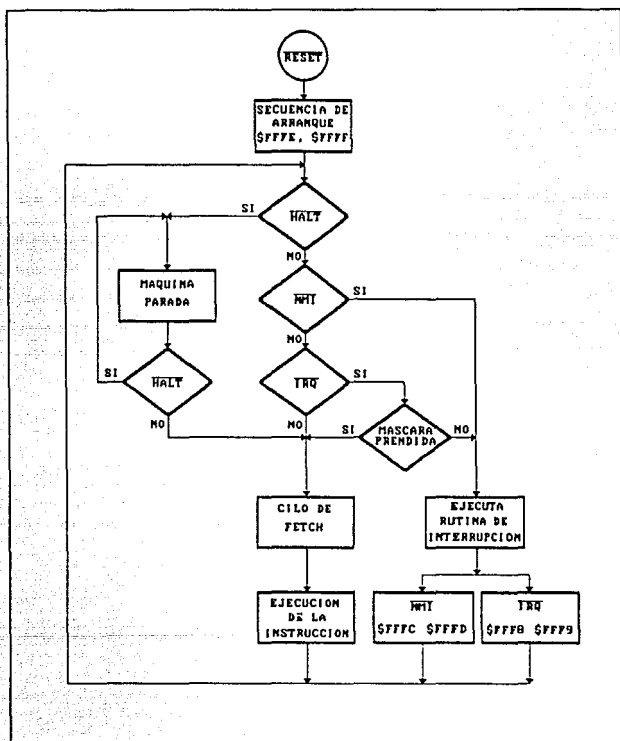
R/W - Esta señal de salida le indica a los dispositivos periféricos cuándo el μ p está leyendo y cuando está escribiendo los datos.

VECTOR		DESCRIPCION
MSB	LSB	
\$FFFE	\$FFFF	REINICIALIZACION
\$FFFC	\$FFFD	INTERRUPCION NO MASCARABLE
\$FFFA	\$FFFB	INTERRUPCION POR SOFTWARE
\$FFF8	\$FFF9	REQUERIMIENTO DE INTERRUP.

Tabla.IV.1. Mapa de memoria para vectores de interrupción.

Para mayor información sobre el μ p6802, consultar el manual de Motorola.

A continuación se presenta un diagrama de flujo, donde se muestra la operación del microprocesador 6802.



IV.2.b) CIRCUITOS PERIFERICOS.

-MAPA DE MEMORIA Y PUERTOS.

A continuación presentamos el mapa de memoria y puertos, con su consiguiente lógica de decodificación. La Tabla IV.2. muestra la correspondencia de las direcciones, a cada dispositivo del circuito digital.

A15	A14	A13	A12	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0			
x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		RAM	
x	x	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
x	x	0	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	ACCESO A	PIA U2	
x	x	0	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	CONTROL A		
x	x	0	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	0	ACCESO B		
x	x	0	1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	CONTROL B		
x	x	0	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	ACCESO A	PIA U4
x	x	0	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	CONTROL A	
x	x	0	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	0	ACCESO B	
x	x	0	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	CONTROL B	
x	x	1	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	ACCESO A	PIA U3
x	x	1	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	CONTROL A	
x	x	1	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	0	ACCESO B	
x	x	1	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	CONTROL B	
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0		TIMER
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	0		
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	1	1		
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	0	0		
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	0	1		
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	0		
x	x	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	1		
x	x	1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	EPROM	

LOGICA DE DECOD.

Tabla IV.2. Mapa de memoria y Puertos.

En la Tabla IV.2. se puede observar que los bits A11, A12 y A13 del bus de direcciones se encarga de seleccionar a un dispositivo, mientras los bits A0, A1 y A2 determinan una función específica en cada dispositivo seleccionado.

Cuando se ha seleccionado cualquiera de las PIA's solo se consideran el bit A0 y A1, para definir una función específica del circuito. Para cualquier PIA el bit A1 indica que puerto se selecciona, si $A1 = 0$ se accesa al puerto A, y si $A1 = 1$ al puerto B. Una vez que se ha seleccionado el puerto requerido se utiliza el bit A0 para definir la función, esto es si $A0 = 1$, estaremos programando el registro de control del puerto. Para el caso en que $A0 = 0$, dependiendo del valor del bit 2 del registro de control tendremos dos funciones: si es bajo (0), estaremos definiendo las entradas y salidas del registro periférico en modo bit; y si es alto (1) habilitaremos el registro periférico para captar o enviar datos.

En el caso del timer utilizaremos las tres direcciones más bajas (A0, A1 y A2), para acceder los registros internos y dependiendo de la línea de R/W estaremos leyendo o escribiendo en estos registros.

Para mayor información sobre estos dispositivos periféricos consultar el manual de Motorola.

La selección de las memorias ya sea la RAM interna o la EPROM externa se realiza también con los bit A13, A12 y A11 del bus de direcciones, en este caso los bit menos significativos de este bus se encargan de seleccionar las diferentes localidades de memoria.

En la Figura VI.6. se muestra la lógica de decodificación y las conexiones del chip utilizado: 74LS156.

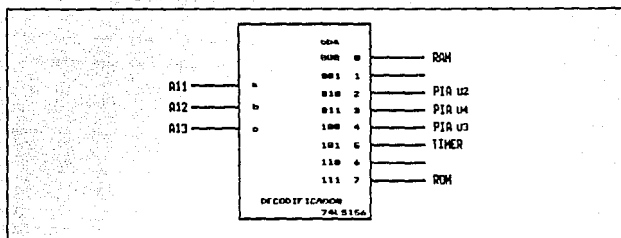


Fig.IV.6. Lógica de decodificación.

Los Puertos:

Como ya se dijo antes, los puertos o PIA's (Peripheral Interface Adapter) son los dispositivos a través de los cuales el microprocesador tiene contacto con la circuitería exterior.

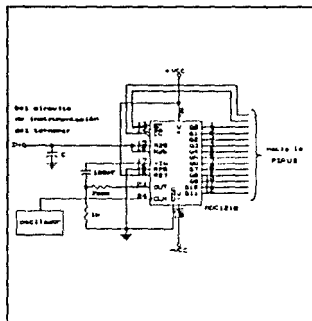


Fig.IV.7. Diagrama de conexión del ADC-1210

La PIA U2 es la encargada de leer los valores de temperatura, ya digitalizados por el convertor analógico digital ADC-1210. (Ver Figura IV.7. y también módulo "A", en el circuito del sistema digital, en el Anexo 1 de este capítulo). La señal analógica proviene del circuito de instrumentación del termopar, cuyos detalles se describen en el capítulo V. Esta señal varía entre 0 y 5V, por lo que la configuración utilizada en el convertor está diseñada para leer precisamente esta gama de voltajes, pero invertida; esto es, el valor binario más alto corresponde a una señal de 0V y el

valor más bajo a 5V. El convertidor tiene una precisión de 12 bits, por lo que tendremos 4096 cuentas para toda la escala. Como el circuito de instrumentación nos entrega un voltaje que varía linealmente, con respecto a la temperatura, la precisión que tendremos será de 1.22mV por cuenta, y si sabemos que 5V equivalen a 1024°C tendremos una precisión de 0.25°C por cuenta.

Por su parte, la PIA U3 tiene dos funciones. La primera es registrar la corriente (por medio del puerto B), que se le está suministrando a la resistencia del horno, por medio del circuito de potencia descrito anteriormente. Como esta función se implementó únicamente como protección, para proteger el sistema de potencia en caso de falla por corto circuito, su digitalización se realiza a través de un convertor analógico digital de 8 bits (ADC-0800). El detalle de este circuito se puede observar en el módulo "B", del circuito digital presentado en el Anexo 1 del capítulo.

El puerto A de la PIA U3, se encarga de proporcionar el voltaje de referencia, al circuito de disparo de los tiristores. Dicho de otra forma, es la señal por medio de la cual el sistema digital regula la potencia suministrada a la resistencia del

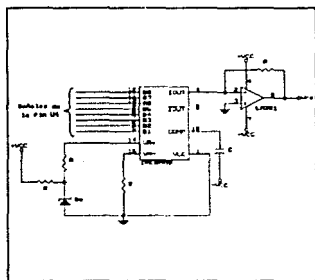


Fig. IV.8. Circuito convertidor digital

horno. La señal digital proporcionada por el puerto es convertida en una analógica, a través de un convertor digital analógico, DAC-0800. Se trata de un convertor de 8 bits, cuya salida analógica varía entre 0 y 5V. El primer límite equivale a suministrar al horno la máxima potencia que es capaz de entregar el sistema de potencia; el segundo límite, (5V) equivale a un cierre total en el suministro de energía hacia el horno. En la Figura IV.8. se muestra el

detalle de las conexiones de este circuito y su interacción con el sistema digital se ilustra en el modulo "C" del circuito, en el Anexo I de este capítulo.

Finalmente, la PIA U4 se encarga de la interacción entre el usuario y el sistema. Efectuando el despliegue de la información necesaria en el display y del control del teclado del circuito. El display está constituido por tres dígitos, excitados a través de convertidores de BCD a 7 segmentos; se trata del circuito 7446. En estado de operación del sistema, en este display se podrá visualizar la temperatura del horno, así como algunos parámetros con que fue programada la operación que se lleva a cabo en ese momento.

El teclado está constituido por una matriz de bloques y columnas switcheable, la que es decodificada a través de un circuito diseñado para este propósito, el 74LS922. Por medio de éste, el usuario es capaz de programar los distintos tipos de gráficas, así como la duración de los eventos. En estado de operación, será posible desplegar algunos parámetros de la operación, como temperatura y tipo de gráfica. La interacción de estos dos circuitos, display y teclado, se puede apreciar en los módulos "D" y "E", respectivamente, en el circuito del sistema (Anexo I de este capítulo).

También existe otro dispositivo, el 6840 (Programmable Timer Module), que no es más que un reloj que se encargará de interrumpir al microprocesador cuando transcurra un tiempo dado, previamente programado.

IV.3. SOFTWARE DEL SISTEMA.

El objetivo del programa es el de controlar la temperatura del horno, de acuerdo a las siguientes consideraciones:

1) Programar el horno hasta un máximo de ocho niveles, siendo todos diferentes o algunos repetidos. Cada nivel se podrá programar con un tiempo máximo de 999 min (16 hrs y 39 min) y todo lo anterior se podrá repetir hasta 65,536 veces.

Por lo cual, si se programan ocho niveles de temperatura, con el tiempo máximo cada uno y con el máximo número de ciclos, el proceso involucra un tiempo de 363,724.8 días.

Por ejemplo, si se quieren programar 3 niveles de temperatura, a 150°C, 200°C y 700°C y con tiempos de 10 hrs, 5 hrs y 16 hrs, respectivamente, el comportamiento será como se muestra en la fig.IV.9.

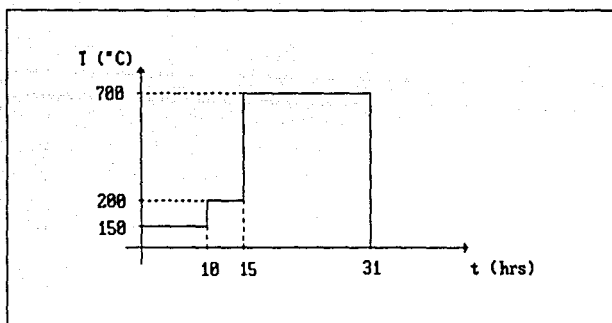


Fig.IV.9. Comportamiento de la gráfica de temp., programada para tres niveles.

Si se programan 4 niveles de temperatura, a 200°C, 800°C, 600°C y 400°C, con tiempos de 5 hrs., 10 hrs., 3 hrs., y 16 hrs., respectivamente, con dos ciclos, la gráfica quedaría como se ve en la Figura IV.10.

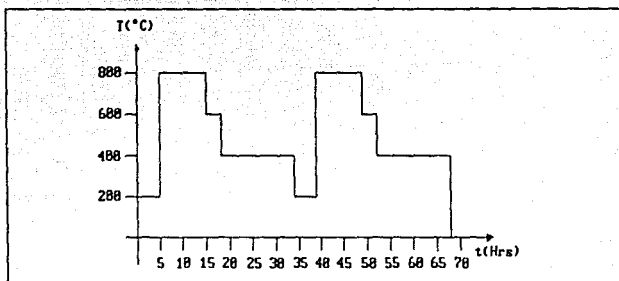


Fig.IV.10. Comportamiento de la gráfica de temperatura, programada para cuatro niveles y dos ciclos.

Así, se podrá obtener una infinidad de comportamientos.

Esto nos permitiría poder programar un solo nivel de temperatura durante 363,724.8 días.

Por último, cabe señalar que entre un nivel de temperatura y otro existe un retardo en alcanzar el estado permanente, debido a las características del horno.

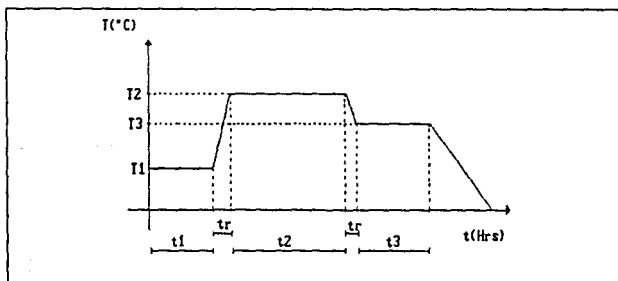


Fig.IV.11. Gráfica que muestra el tiempo de retardo en alcanzar los niveles de temperatura.

Por esto mismo, los tiempos de programación se consideran desde el momento en que se alcanza la temperatura programada (Véase la Figura IV.11.).

donde:

T1 = Temperatura programada 1.

T2 = Temperatura programada 2.

T3 = Temperatura programada 3.

t1 = tiempo programado 1.

t2 = tiempo programado 2.

t3 = tiempo programado 3.

t_r = tiempo de retardo.

Cabe señalar que el tiempo de retardo (t_r) depende de las características propias de calentamiento y enfriamiento del horno.

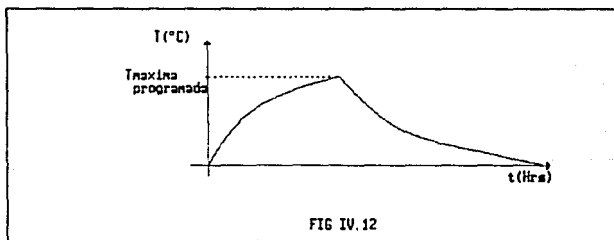


Fig.IV.12. Gráfica de la temperatura, para que alcance un nivel programado y posteriormente regrese.

2) Programar el horno, para que alcance una temperatura requerida y posteriormente regrese a su condición inicial, de acuerdo a las características del mismo.

En este caso, el tiempo que tarda el horno en alcanzar la temperatura requerida depende de sus características, así como del valor de la temperatura que se quiera alcanzar.

Gráficamente, esto se puede ver en la Figura IV.12.

INTRODUCCION DE DATOS.

De acuerdo con el objetivo del programa, el primer dato que se introducirá será el tipo de comportamiento que se requiere (tipo de gráfica, TG), siendo éste de 1 o 2, de acuerdo a las condiciones establecidas.

Si TG = 1, posteriormente se dará el número de niveles (NIV) que se requieren, para después dar la temperatura (T) y tiempo (t) de cada uno, finalizando con el número de ciclos (CIC) que realizará todo lo anterior. Cabe señalar que los tiempos de programación deben proporcionarse en minutos, cosa que optimiza la operación del sistema, haciéndola más sencilla..

Por ejemplo, si se quiere obtener el comportamiento con TG = 1, para 5 niveles, a temperaturas de 310°C, 580°C, 132°C, 983°C y 200°C, con tiempos de 13 hrs, 2 hrs, 5 hrs, 7 hrs y 11 hrs, respectivamente, y que realice 3 ciclos (CIC), entonces la secuencia para introducir los datos sería:

```
[ -RESET - ]  
TG      [ 1 ]      < ENTER >
```

NIV	[5]	< ENTER >	
T1	[310]	< ENTER >	(°C)
t1	[780]	< ENTER >	(min)
T2	[580]	< ENTER >	(°C)
t2	[120]	< ENTER >	(min)
T3	[132]	< ENTER >	(°C)
t3	[300]	< ENTER >	(min)
T4	[983]	< ENTER >	(°C)
t4	[420]	< ENTER >	(min)
T5	[200]	< ENTER >	(°C)
t5	[660]	< ENTER >	(min)
CIC	[3]	< ENTER >	(Ciclos)

Si se quiere obtener el $TG = 1$ con un nivel a 750°C , durante 36 hrs, el procedimiento sería:

```

< RESET >

TG      [ 1 ]   < ENTER >
NIV     [ 1 ]   < ENTER >
T1      [750]   < ENTER >

```

t1 [540] < ENTER > (540min*4 =2160min =36hrs)
CIC [4] < ENTER >

Si TG = 2, posteriormente se introducirá el valor de la temperatura requerida.

Por ejemplo si se quiere el comportamiento TG = 2 y que alcance una temperatura de 650°C, la introducción de datos sería de la siguiente manera:

< RESET >
TG [2] < ENTER >
T [650] < ENTER >

Si se desea conocer algún dato programado; por ejemplo el tipo de gráfica, número de niveles, número de ciclos, temperatura o tiempo de algún nivel, se oprime una tecla (D) para indicar al microprocesador que de acuerdo al número que se introduzca posteriormente lo compare con un código establecido y despliegue el dato requerido.

La relación que existe entre el dato proporcionado y el valor programado es el siguiente:

DATO	DESPLIEGA
1	Tipo de gráfica (TG).
2	Numero de niveles (NIV) del 1 al 8.
3	Nivel que se esta procesando.

4	Ciclos programados.
5	Ciclo que se está procesando.
6	Tiempo que falta por terminar el nivel actual.
n1	Temperatura programada de nivel (n de 1 a 8).
n2	Tiempo programado de nivel (n de 1 a 8).

MUESTREO.

Para su correcto funcionamiento, el programa debe permitir muestrear la temperatura, a fin de alcanzar y estabilizar las temperaturas programadas.

Al mismo tiempo, debe estar muestreando la corriente que pasa por el circuito de potencia por medio de un shunt, para que, en caso de que exista una sobrecorriente se realicen las medidas necesarias para suspender la alimentación del circuito e indicar el sobreflujo de corriente.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.

Por facilidad en la elaboración y mantenimiento del programa, éste se hizo en forma estructurada y mediante los bloques que se muestran en la Figura IV.13.

La función de cada bloque es la siguiente:

PROGRAMA PRINCIPAL.

Este tiene la finalidad de controlar y dirigir todo el funcionamiento del sistema, auxiliándose de otros bloques (Sub-rutinas) que se ejecutan varias veces en el

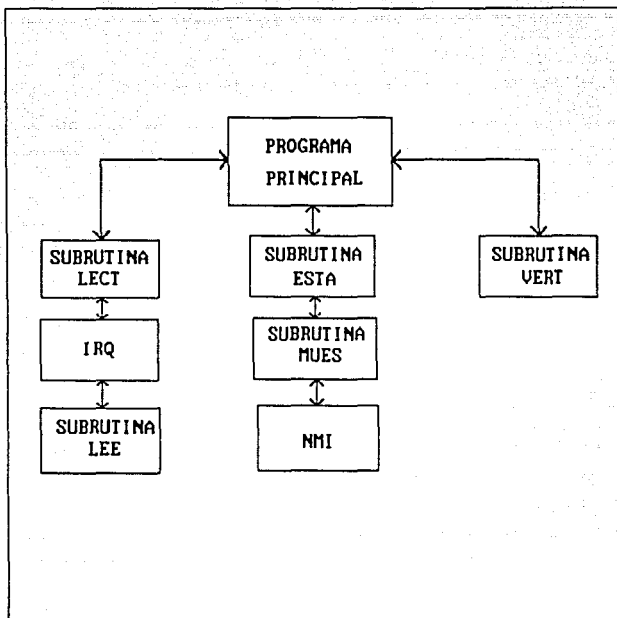


Fig.IV.13. Diagrama de bloques de la estructura del programa.

programa principal, de acuerdo al momento en que se requieran. El diagrama de flujo de este programa se puede apreciar en la Figura IV.14. Aquí podemos observar la parte medular o tronco principal, el que hace llamadas a subrutinas cuyo funcionamiento se explicará en los siguientes párrafos.

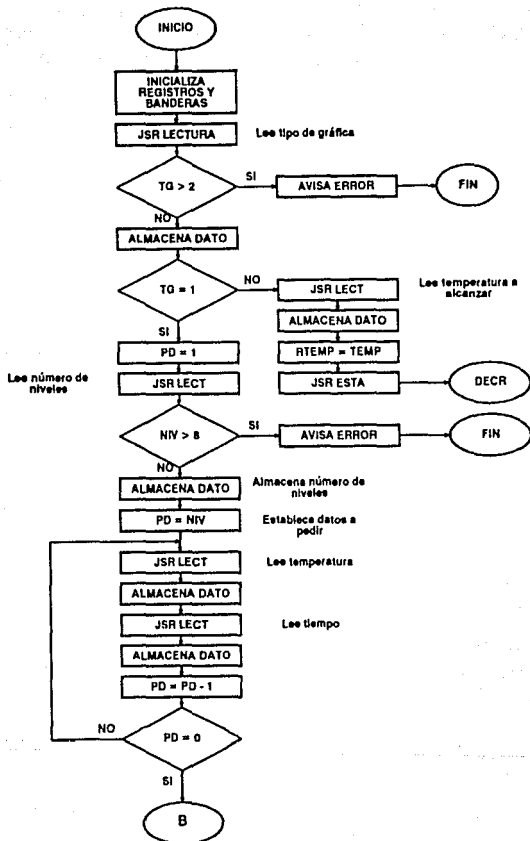


Fig.IV.14. Diagrama de flujo del programa principal.

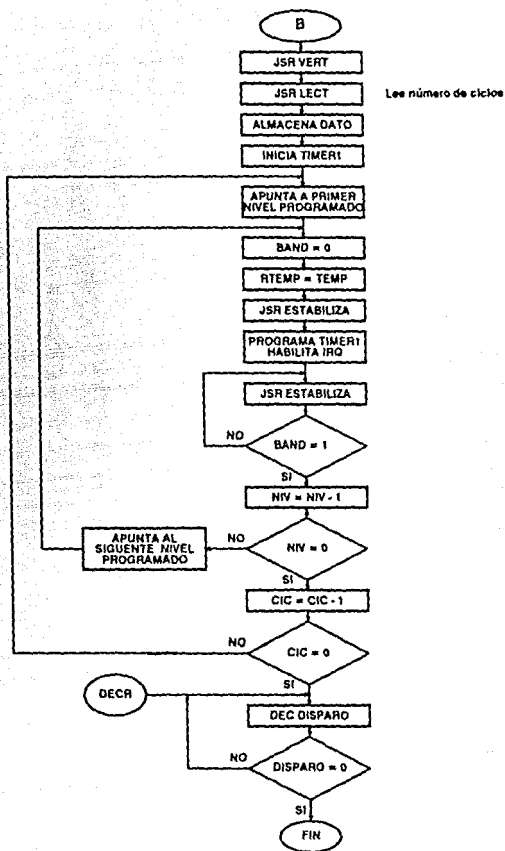


Fig.IV.15. Diagrama de flujo del programa principal (Continuación).

SUB-RUTINA LECT.

Esta subrutina se utiliza para leer los datos que se introducen por el teclado, para lo cual entra en un estado de espera (WAI) hasta que llega una interrupción (IRQ) provocada por la presión de alguna tecla. La subrutina controla el número de dígitos que se introducen, que máximo pueden ser tres. Al presionar la tecla ENTER el control regresa al programa principal.

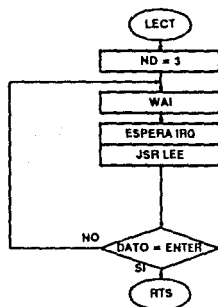


Fig.IV.16. Diagrama de flujo de la subrutina LECT.

BLOQUE DE INTERRUPCION (IRQ)

Este bloque se encarga de ver si se requieren introducir datos, desplegar datos programados o avisar que el reloj que se programó ya terminó de contar.

En la subrutina IRQ que se presenta en el diagrama de la Figura IV.17, lo que se hace es determinar quien generó una interrupción para atenderlo. Preguntando primero al teclado, después al reloj y finalmente al despliegue de datos.

Si lo que se quiere es introducir datos, entonces se transfiere el control a la subrutina LEE, la cual se encarga de dar el valor correspondiente a cada dígito introducido y guardarlo.

Si lo que se requiere es desplegar algún dato que se programa, entonces se transfiere el control a la subrutina LECT, para posteriormente identificar el dato introducido y desplegar lo que se requiere.

En el caso de que el reloj haya terminado de contar un nivel programado, la subrutina interrumpe y habilita una bandera como indicación.

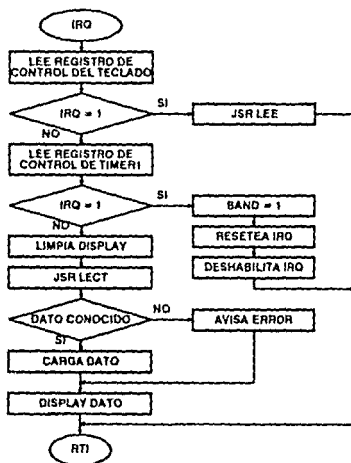


Fig.IV.17. Diagrama de flujo de la subrutina IRQ.

SUB-RUTINA LEE.

Esta subrutina se encarga de ir acomodando los tres dígitos que se introducen como dato. Lo primero que hace es verificar que sean números, para aceptarlos, luego les da el peso correspondiente de unidad, decena o centena según la posición en que se meten y por último el número correspondiente lo almacena en memoria en forma decimal y hexadecimal, una para poder manejar el dato y la otra para desplegarlo. En caso de que se quieran introducir más de tres dígitos manda un mensaje de error.

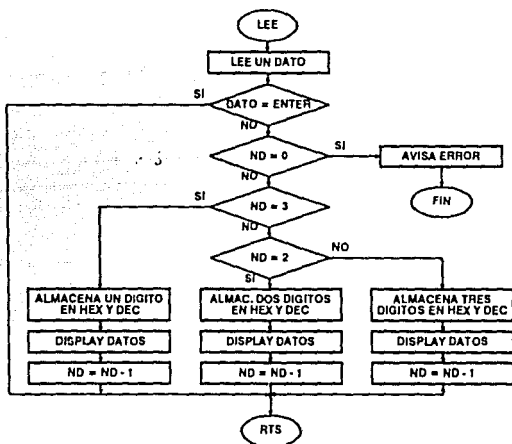
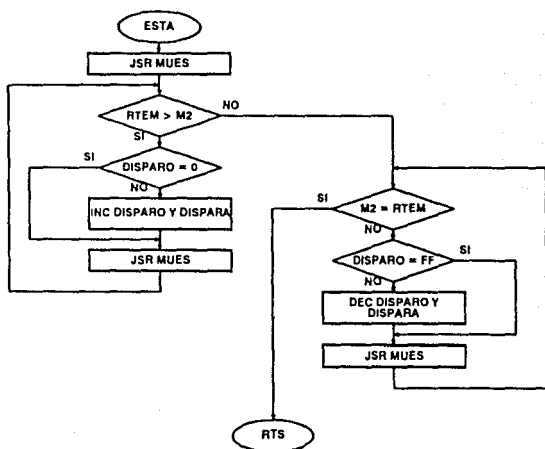


Fig.IV.18. Diagrama de flujo de la subrutina LEE.

SUB-RUTINA ESTA.

En esta subrutina se muestréa el valor de la temperatura para determinar si es mayor o menor que la temperatura programada. Si es menor, lo primero que hace es ver si el disparo de los tiristores esta en su nivel máximo, para en caso de no estar incrementarlo. Si es mayor, se decrementa el nivel de la señal de disparo, poco a poco, hasta que sean iguales, y poder salir de la subrutina.



FigIV.19. Diagrama de flujo de la subrutina ESTA.

SUB-RUTINA MUES.

Esta subrutina se encarga de habilitar a los convertidores analógico-digitales, para posteriormente entrar en un estado de espera (WAI) y transferir el control al bloque NMI.

BLOQUE DE NMI.

Este bloque entra en función después que los DAC's avisan que tienen la muestra de corriente o temperatura disponible. En este bloque se lee primero el valor de la corriente para que, en caso de que haya una sobrecorriente, desconectar la fuente de alimentación y mandar un aviso; si no hay sobrecorriente, entonces lee el valor de la temperatura, lo acondiciona y almacena.



Fig.IV.20. Diagrama de flujo de la subrutina MUES.

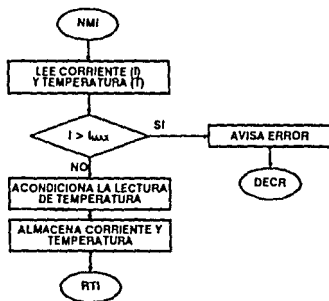
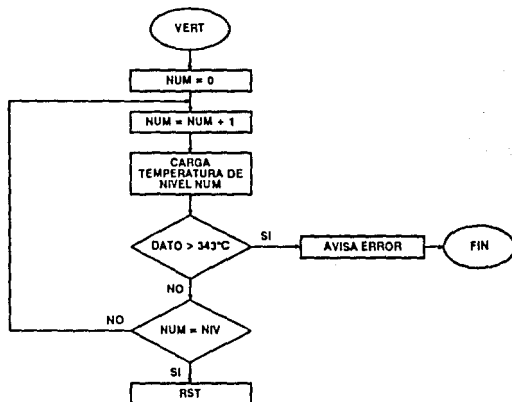


Fig.IV.21. Diagrama de flujo de la subrutina NMI.

SUB-RUTINA VERT.

Esta subrutina tiene como objetivo verificar que cada temperatura programada no sea mayor que la máxima permisible



FigIV21. Diagrama de flujo de la subrutina VERT.

Las abreviaturas que se utilizan en los diagramas de flujo son:

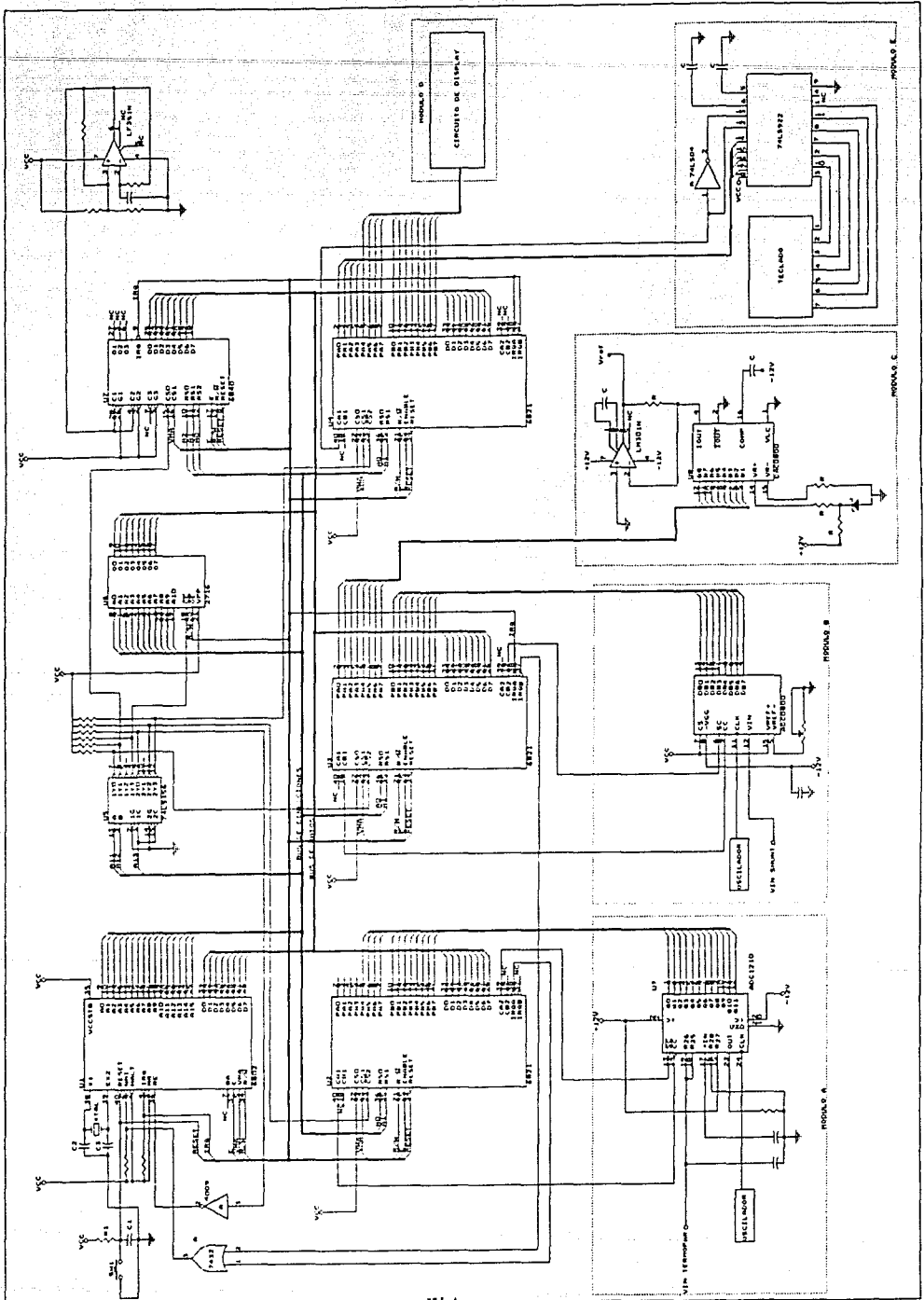
- TG Tipo de gráfica (1 o 2)
- PD Números de datos a pedir (igual a NIV).
- NIV Niveles de temperatura programados.

BAND	Bandera para indicar que el reloj terminó (1)
TEMP	Temperatura Programada.
RTEMP	Señal para TEMP
CIC	Número de ciclos en que se realiza el proceso.
ND	Número permitido de dígitos de un dato (3).
M1	Muestra de corriente.
M2	Muestra de temperatura.

Para señalar mensajes, se utilizó el siguiente código:

CODIGO	DESPLIEGA	INDICA
0A1	0C1	Que $TG > 2$ o $TG = 0$
0A2	0C2	$NIV > 8$ o $NIV = 0$
0A3	0C3	$ND = 0$
0A5	0C5	Que el dato que se quería desplegar no se indicó bien.
0A6	0C6	Alguna $TEMP > Temp. Máxima.$
0AA	0CC	Hay una sobrecorriente
0AB	0[]	Se puede pedir un dato que se programó
0CC	0UU	Fin de proceso.

DIAGRAMA ELECTRICO DEL CIRCUITO DIGITAL



ANEXO 2

LISTADO DEL PROGRAMA

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
			1	"6802"	
			2	; CONTROLADOR DIGITAL PARA LA	
			3	; TEMPERATURA DE UN HORNO	
			4	;	
	<1000>	5	PAM	EQU	1000H ;UN DIRECCIONES DE PIA 02
	<1001>	6	CAM	EQU	1001H
	<1002>	7	PBM	EQU	1002H
	<1003>	8	CBM	EQU	1003H
	<1800>	9	PAT	EQU	1800H ;UN DIRECCIONES DE PIA 04
	<1801>	10	CAT	EQU	1801H
	<1802>	11	PBT	EQU	1802H
	<1803>	12	CBT	EQU	1803H
	<2000>	13	PAD	EQU	2000H ;UN DIRECCIONES DE PIA 08
	<2001>	14	CAD	EQU	2001H
	<2002>	15	PBD	EQU	2002H
	<2003>	16	CBD	EQU	2003H
		17	ORG	0F800H	
F800	0F	18	SEL		;CONTIENE EN LA DIR. 0F800
F801	8E007E	19	LDS	*7EH	;QUITA SERVO. DE INTERRUPT
F804	4F	20	CLER		;DIRECCION INICIO DEL STACK
F805	B71001	21	STAA	CAM	
F808	B71003	22	STAA	CBM	;LIMPIA REGS. DE CONTROL
F80B	B71801	23	STAA	CAT	
F80E	B71803	24	STAA	CBT	
F811	B72001	25	STAA	CAD	
F814	B72003	26	STAA	CBD	
F817	B71000	27	STAA	PAM	;PROGR. LINEAS DE PAM, PBM
F81A	B71002	28	STAA	PBM	;Y PBD COMO ENTRADAS.
F81D	B72002	29	STAA	PBD	
F820	86FF	30	LDAA	*0FFH	
F822	B71802	31	STAA	PBT	;PROGRAMA LINEAS DE PBT
F825	B72000	32	STAA	PAD	;Y PAD COMO SALIDAS.
F828	86F0	33	LDAA	*0EF0H	
F82A	B71800	34	STAA	PAT	;PARA PAT (B0-B3) COMO EN-
F82D	8637	35	LDAA	*37H	;TRADA (B4-B7) COMO SALIDA
F82F	B71001	36	STAA	CAM	
F832	B71003	37	STAA	CBM	;PROGRAMA CA1 Y CA2 DE LOS
F835	B71801	38	STAA	CAT	;PUERTOS QUE SE UTILIZARAN
F838	B72003	39	STAA	CBD	;HABILITA REG. PERIFERICO
F83B	8604	40	LDAA	*04H	
F83D	B72001	41	STAA	CAD	;HABILITA REGS. PERIFERICO
F840	B71803	42	STAA	CBT	
F843	860A	43	LDAA	*0AH	
F845	9708	44	STAA	0008H	;CODIGO DE ENTER
F847	860F	45	LDAA	*0FH	
F849	970A	46	STAA	000AH	;Imax PERMISIBLE(15 A.)
F84B	86FF	47	FIN	LDAA	*0FFH
F84D	9750	48	STAA	0050H	;DISPHEO=0
F84F	B72000	49	STAA	PAD	
		50			;INICIALIZA VARIABLES
F852	7F0001	51	CLR	0001H	;TIPO DE GRAFICA
F855	7F0002	52	CLR	0002H	;FIN PROGRAMADO
F858	7F0003	53	CLR	0003H	;FIN PREGS TEMPORAL
F85B	7F0004	54	CLR	0004H	;INDICADOR DE DATOS
F85E	7F0005	55	CLR	0005H	;BANDERA DE ERROR
F861	7F0006	56	CLR	0006H	;BAND. BANDERA DE TIMEP
F864	7F0007	57	CLR	0007H	;BANDERA PARA HAB. TECLADO

LOCATION	OBJECT CODE	LINE	SOURCE LINE	
F867	2F009	58	CLR	0009H ;BANDERA PARA INDICAR QUE
		59		;SE ESTA EN ESTABILIZACION
		60		;DE ALGUNA TEMPERATURA.
F86A	BDF9DA	61	JSR	DECT ;MARCA A LEER TG
F86D	0654	62	LDAB	005AH ;OE SI TG>2
F86F	0100	63	CMFB	#00H
F871	2708	64	BEQ	J4
F873	86A1	65	LDAA	#0A1H ;SEÑALA ERROR SI ES EL MSB
F875	2F1800	66	CLR	PAT
F878	871802	67	STAA	PAT
F87B	2EF84B	68	JMP	FIN
F87E	065B	69	LDAB	005BH ;OE SI ES MAYOR EL LSB1
F880	0102	70	CMFB	#02H
F882	2308	71	BLS	C
F884	86A1	72	LDAA	#0A1H ;SEÑALA ERROR
F886	2F1800	73	CLR	PAT
F889	871802	74	STAA	PAT
F88C	2EF84B	75	JMP	FIN
F88F	0100	76	CMFB	#00H ;OE SI TG =0
F891	260B	77	BNE	C1
F893	86A1	78	LDAA	#0A1H
F895	2F1800	79	CLR	PAT
F898	871802	80	STAA	PAT
F89B	2EF84B	81	JMP	FIN ;PUENTE PARA SEQ FIN
F89E	0701	82	STAB	0001H ;PUENTE PARA QUE EN TG
F8A0	0101	83	CMFB	#01H ;OE SI TG=1
F8A2	260B	84	BNE	J2
F8A4	0601	85	LDAB	#01H ;SI TG=1
F8A6	0 0E	86	STAB	000BH ;PUENTE
F8A8	2024	87	BRA	HLFA
F8AA	01	88	DFE	J2 ;SI TG=2
F8AC	BDF9DA	89	JSR	DECT ;LEE TEMP PARA CON A ALGUNOS
F8AE	BDF9DA	90	JSR	DECT
F8B1	DE00	91	LDX	0000H
F8B3	9654	92	LDAA	0054H ;TEMP POR EN DEC.
F8B5	0710	93	STAA	0010H
F8B7	9653	94	LDAA	0053H ;TEMP POR EN DEC.
F8B9	0701	95	STAA	0001H ;TEMP-TEMP (MSB)
F8BB	07	96	DFE	J4
F8BD	965E	97	LDAA	005EH ;DATO LSB EN HEX.
F8BF	0710	98	STAA	0010H,X
F8C0	9659	99	LDAA	0059H ;DATO LSB EN DEC.
F8C2	9750	100	STAA	0050H ;TEMP-TEMP (LSB)
F8C4	8601	101	LDAA	#01H ;INDICA QUE SE ESTA
F8C6	9709	102	STAA	0009H ;EN PROCESO.
F8C8	BDF9DA	103	JSR	DECT
F8CB	2EF9C3	104	JMP	DECT
F8CE	BDF9DA	105	JSR	DECT ;LEE NUMERO DE NIVELES
F8D1	965A	106	LDAA	005AH ;OE SI EL NUMERO DE NIVELES
F8D3	8100	107	CMFA	#00H ;ES MAYOR AL MAXIMO (8).
F8D5	2708	108	BEQ	J4
F8D7	86A2	109	LDAA	#0A2H ;MARCA ERROR POR SER >8
F8D9	2F1800	110	CLR	PAT
F8DC	871802	111	STAA	PAT
F8DF	2EF84B	112	JMP	FIN
F8E2	965B	113	LDAA	005BH
F8E4	8108	114	CMFA	#08H

LOCATION	OBJECT CODE	LINE	SOURCE	LINE
F8E6	230B	115	BLS	J5
F8E8	86A2	116	LDAA	#0A2H ;MARCA ERROR POR SER >8
F8EA	2F1800	117	CLR	PAT
F8ED	B71802	118	STAR	PBT
F8F0	2EF84B	119	JMP	FIN
F8F3	8100	120	CMPL	#00H
F8F5	260B	121	BNE	JJ5
F8F7	86A2	122	LDAA	#0A2H ;MARCA ERROR POR SER=0
F8F9	2F1800	123	CLR	PAT
F8FC	B71802	124	STAR	PBT
F8FF	2EF84B	125	JMP	FIN
F902	9702	126	JJ5	STAR 0002H
F904	9703	127	STAR	0003H ;ALMACENA # DE NIO<#8
F906	970B	128	STAR	000BH ;PD=# DE NIO (<#8)
F908	0E0000	129	LDX	#0000H ;INICIALIZA IX
F90B	BDF9DA	130	JSR	LECT ;LEE TEMPERATURA.
F90E	BDF81E	131	JSR	VERT
		132		;PREP LA TEMPERATURA
F911	965A	133	LDAA	005AH ;DATO MSB EN HEX
F913	A710	134	STAR	0010H,X
F915	965B	135	LDAA	005BH ;DATO MSB EN DEC
F917	A720	136	STAR	0020H,X
F919	08	137	INX	
F91A	965B	138	LDAA	005BH ;DATO LSB EN HEX
F91C	A710	139	STAR	0010H,X
F91E	965B	140	LDAA	005BH ;DATO LSB EN DEC
F920	A720	141	STAR	0020H,X
F922	09	142	DEX	
F923	BDF9DA	143	JSR	LECT ;MANDA A LEER TIEMPO.
F926	965A	144	LDAA	005AH
F928	A730	145	STAR	0030H,X ;DATO MSB EN HEX.
F92A	08	146	INX	
F92B	965B	147	LDAA	005BH
F92D	A730	148	STAR	0030H,X ;DATO LSB EN HEX.
F92F	09	149	DEX	
F930	D658	150	LDAB	0058H ;DATO MSB EN DEC.
F932	965B	151	LDAA	005BH ;DATO LSB EN DEC.
F934	0C	152	CLC	;CONVIERTE DE MIN. A SEG
F935	49	153	ROLA	
F936	59	154	ROLB	;PRIMER CORRIENTO.
F937	49	155	ROLA	
F938	59	156	ROLB	;SEGUNDO CORRIENTO.
F939	975D	157	STAR	005DH ;LSB: ALMACENA
F93B	D25C	158	STAR	005CH ;MSB: TEMPORALMENTE.
F93D	49	159	ROLA	
F93E	59	160	ROLB	;TERCER CORRIENTO.
F93F	49	161	ROLA	
F940	59	162	ROLB	;CUARTO CORRIENTO.
F941	49	163	ROLA	
F942	59	164	ROLB	;QUINTO CORRIENTO.
F943	49	165	ROLA	
F944	59	166	ROLB	;SEXTO CORRIENTO.
F945	0C	167	CLC	
F946	925D	168	SBCA	005DH
F948	D25C	169	SBCB	005CH
F94A	E740	170	STAR	0040H,X ;DATO MSB. EN DEC.
F94C	08	171	INX	

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
F94D	A740		172	STAA	0040H,X ;DATO LSB EN DEC.
F94E	0E		173	INX	
F950	74000B		174	DEC	000BH ;PD-PD-1
F953	D60B		175	LDAB	000BH
F955	C100		176	CMPB	#00H
F957	26B2		177	BNE	ETA
F959	BDF90H		178	JSK	LEET ;LEE # DE CICLOS
F95C	965H		179	LDAA	005BH
F95E	9756		180	STAA	0056H ;DATO MSB EN HEX
F960	965B		181	LDAA	005BH
F962	9757		182	STAA	0057H ;DATO LSB EN HEX
F964	965B		183	LDAA	005BH
F966	9754		184	STAA	0054H ;DATO MSB EN DEC
F968	9659		185	LDAA	0059H
F96A	9755		186	STAA	0055H ;DATO LSB EN DEC
F96C	C601		187	LDAB	#01H ;PROGRAMA TIMER 1 Y DESABA.
F96E	D707		188	STAB	0007H ;LINA TECLADO PARA EVITAR
			189		;ERRORES DURANTE EL PROCES
F970	F72001		190	STAB	2801H ;ESCRIBE EN CR#2
F973	C6E0		191	LDAB	#0E0H
F975	F72000		192	STAB	2800H ;ESCRIBE EN CR#1
F978	C60000		193	LDX	#0000H ;APUNTA A 1er NIVEL PROGRA.
F97B	9602		194	LDAA	0002H ;NIVEL PROGRAMADO
F97D	9703		195	STAA	0003H
F97F	7F0006		196	CLR	0006H ;BANDERA IRQ DE TIMER
F982	A620		197	LDAA	0020H,X ;RACE RTM=TEMP
F984	975C		198	STAA	005CH
F986	0B		199	INX	
F987	A620		200	LDAA	0020H,X
F989	975D		201	STAA	005DH
F98B	09		202	DEX	
F98C	BDFAB1		203	JSK	ESTA
F98F	A640		204	LDAA	0040H,X ;CARGA MSB TIEMPO EN DEC
F991	B72B02		205	STAA	2802H ;ESCRIBE EN MSB REGISTER
F994	0B		206	INX	
F995	A640		207	LDAA	0040H,X ;CARGA LSB TIEMPO EN DEC
F997	B72B03		208	STAA	2803H ;ESCRIBE EN TIMER
F99A	C6E0		209	LDAB	#0E0H ;HABILITA IRQ.
F99C	F72B00		210	STAB	2800H
F99F	B601		211	LDAA	#01H ;INDICA QUE ESTA
F9A1	9709		212	STAA	0009H ;EN UN NIVEL.
F9A3	BDFAB1		213	JSK	ESTA
F9A6	D606		214	LDAB	0006H ;VE SI TIMER=0000
F9A8	C100		215	CMPB	#00H
F9AA	27F7		216	BEQ	J6
F9AC	7F0009		217	CLR	0009H ;INDICA QUE SE ESTA CAMBIAN
			218		;A OTRO NIVEL PROGRAMADO.
F9AF	740005		219	DEC	0003H ;DECREMENTA NUMERO DE NIVEL
F9B2	0B		220	INX	;APUNTA SIGUIENTE MSB TIEM
F9B3	D603		221	LDAB	0003H
F9B5	C100		222	CMPB	#00H ;VE SI NIV=0
F9B7	26C6		223	BNE	J7
F9B9	DE54		224	LDX	0054H ;CARGA # CICLOS
F9BB	09		225	DEX	;CIC=CIC-1
F9BC	DE54		226	STX	0054H
F9BE	8C0000		227	CPX	#0000H
F9C1	26B5		228	BNE	J8

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
F903	700050		229	DECK INC	0050H ;DISMINUYE DISPARO
F906	9650		230	LDAA	0050H ;HASTA SER CERO.
F908	B72000		231	STAA	P40
F90B	81FF		232	CMPI	#0FFH
F90D	26F4		233	BNE	DECK
F90F	8600		234	LDAA	#000H ;CODIGO DE FIN DE PROCESO
F901	7F1800		235	CLR	PAT
F904	B71802		236	STAA	PBT
F907	7EF84B		237	JMP	FIN
			238		
			239		; INICIO DE SUBROUTINAS:
			240		;*****
F90A	8603		241	LECT LDAA	#03H ;SUBROUTINA DE LECTURA:
F90C	9704		242	STAA	0004H ;ND=3
F90E	0E		243	J9 CL1	
F90F	3E		244	WAI	
F910	D604		245	LDAB	0004H ;ESPERA JSR LEE UN DATO
F912	C103		246	CMPI	#03H ;OE SI ND CONTINUA IGUAL
F914	27F8		247	BEQ	J9
F916	D608		248	LDAB	0008H ;OE SI DATO=ENTER,
F918	D10C		249	CMPI	000CH ;DIR. CODIGO DE ENTER.
F91A	26F2		250	BNE	J9
F91C	7F1800		251	CLR	PAT
F91E	7F1802		252	CLR	PBT
F922	39		253	RTS	
			254		;REGRESA DE LA SUBROUTINA
			255		;*****
			256		;SUBROUTINA LEE UN DATO
F923	B61800		256	LEE LDAA	PAT
F926	840F		257	ANDA	#0FH ;LEE UN DATO DEL TECLADO
F928	970C		258	STAA	000CH ;ALMACENA EL DATO
F92A	810A		259	CMPI	00AH ;OE SI ES ENTER
F92C	270F		260	BEQ	J10
F92E	D604		261	LDAB	0004H ;OE A ND
FA00	C100		262	CMPI	#00H
FA02	260C		263	BNE	J11
FA04	C6A3		264	LDAB	00A3H ;MARCA ERROR SI ND=0
FA06	7F1800		265	CLR	PAT
FA09	F71802		266	STAB	PBT
FA0C	3E		267	WAI	
FA0D	7EF84B		268	J10 JMP	J10 ;SEÑALA ERROR.
FA10	C103		269	J11 CMPI	#03H ;FUENTE PARA BEQ.
FA12	2615		270	BNE	J12 ;OE SI ND=3
FA14	975B		271	STAA	0059H ;PRIMER DIGITO:
FA16	9759		272	STAA	0059H ;GUARDA DATO EN
FA18	7F005A		273	CLR	005AH ;HEX. Y DEC.
FA1B	7F0058		274	CLR	0058H
FA1E	7F1800		275	CLR	PAT ;DISPLAY
FA21	B71802		276	STAA	PBT
FA24	7A0004		277	DEC	0004H ;ND=ND-1
FA27	207A		278	BEH	J10
FA29	C102		279	J12 CMPI	#02H
FA2B	2625		280	BNE	J13
FA2D	D659		281	LDAB	0059H ;SEGUNDO DIGITO:
FA2F	0C		282	CLC	
FA30	59		283	ROLB	
FA31	D759		284	STAB	0059H ;1er. CORRIMIENTO
FA33	59		285	ROLB	

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
FA34	59		286	R0LB	
FA35	0758		287	STAB	0058H ;ser. CORRIMIENTO
FA37	0B59		288	ADDB	0059H ;SUMA 1er Y 3er CORRIM.
FA39	1B		289	ABA	;SUMA 2do Y 3er DIGITO
FA3A	9759		290	STAB	0059H ;1ro Y 2do DIGITOS
FA3C	0658		291	LDAB	0058H ;ALMACENADOS.
FA3E	7F0058		292	CLR	0058H
FA41	0C		293	CLC	
FA42	59		294	R0LB	
FA43	0B0C		295	ADDB	000CH
FA45	0758		296	STAB	0058H ;ALMACENA DATO EN HEX
FA47	7F1800		297	CLR	0000H ;DISPLAY DATO
FA4A	F71802		298	STAB	0000H
FA4D	7A0004		299	DEC	0004H ;IND=ND-1
FA50	2051		300	BRA	J10
FA52	9659		301	LDAA	0059H ;TERCER DIGITO:
FA54	0C		302	CLC	
FA55	5F		303	CLRB	
FA56	49		304	R0LB	
FA57	59		305	R0LB	
FA58	9759		306	STAB	0059H ;ALMACENA 1er CORRIMIENTO
FA5A	0758		307	STAB	0058H
FA5C	49		308	R0LA	
FA5D	59		309	R0LB	
FA5E	49		310	R0LA	;ser CORRIMIENTO
FA5F	59		311	R0LB	
FA60	0C		312	CLC	
FA61	9959		313	ADCA	0059H ;SUMA 1er Y 3er CORRIM.
FA63	0958		314	ADCB	0058H
FA65	7F005A		315	CLR	005AH ;ALMACENA DIGITOS ANTER
FA68	0C		316	CLC	;SUMA ULTIMO DIGITO QUE-
FA69	990C		317	ADCA	000CH ;ENTRO A LOS DOS ANTEROS
FA6B	095A		318	ADCB	005AH
FA6D	9759		319	STAB	0059H ;1ro,2do Y 3er DIGITOS
FA6F	0758		320	STAB	0058H ;ALMACENADOS.
FA71	7F005A		321	CLR	005AH
FA74	0C		322	CLC	
FA75	79005B		323	R0L	005BH ;UBICA 1ro Y 2do DIGITOS
FA78	79005A		324	R0L	005AH
FA7B	79005B		325	R0L	005BH
FA7E	79005A		326	R0L	005AH
FA81	79005B		327	R0L	005BH
FA84	79005A		328	R0L	005AH
FA87	79005B		329	R0L	005BH
FA8A	79005A		330	R0L	005AH
FA8D	9658		331	LDAA	0058H
FA8F	9B0C		332	ADDA	000CH
FA91	9758		333	STAB	0058H
FA93	065A		334	LDAB	005AH
FA95	0C		335	CLC	
FA96	59		336	R0LB	;UBICA EL DIGITO EN
FA97	59		337	R0LB	;EL MSB DEL PAT.
FA98	59		338	R0LB	
FA99	59		339	R0LB	
FA9A	B71802		340	STAB	0000H
FA9D	F71800		341	STAB	0000H
FAA0	7A0004		342	DEC	0004H

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
FB00	8401		514	ANDA	#01K
FB0F	8101		515	CMPA	#01H
FB11	260C		516	BNE	J29
FB13	8601		517	LDAA	#01K ;RACE BAND=1
FB15	9706		518	STAA	0006H
FB17	86H1		519	LDAA	#0H1H ;RESETAR IRQ DE
FB19	872800		520	STAA	2800H ;TIMER Y DESAH-
FB1C	7EFD56		521	JMP	X1 ;BILITA IRQ.
			522		;ENTONCES SE QUIERE
			523		;DISPLAY DATOS.
FB1F	7F1800		524	J29 CLR	PAT ;LIMPIA DISPLAY'S
FB22	2F0007		525	CLR	0007H ; PERMITE QUE SE IN-
			526		;TRODUZCAN DATOS PH-
			527		;PAPA VER ALGUNOS
			528		;VALORES.
FB25	06AB		529	LDAB	#0ABH ;SEÑALA QUE SE PUEDEN
FB27	F71802		530	STAB	PBT ;INTRODUCIR DATOS.
FB2A	8DF9DA		531	JSR	LECT
FB2D	8601		532	LDAA	#01H ;DESABILITA EL TE-
FB2F	9707		533	STAA	0007H ;CLADO NUEVAMENTE.
FC01	965A		534	LDAA	005AH
FC03	8100		535	CMPA	#00K
FC05	260C		536	BNE	J55
FC07	965B		537	LDAA	005BH ;CARGA EL DATO
FC09	8191		538	CMPA	#01K ;DATO=TG
FC0B	2609		539	BNE	J30
FC0D	9601		540	LDAA	0001H
FC0F	5F		541	CLRB	
FC10	7EFD4B		542	JMP	XX
FC13	7EFD09		543	J55 JMP	J56 ;PUENTE PARA BNE
FC16	8102		544	J30 CMPA	#02H ;DATO=NIU PROGRAMADO.
FC18	2606		545	BNE	J52
FC1A	9602		546	LDAA	0002H
FC1C	5F		547	CLRB	
FC1D	7EFD4B		548	JMP	XX
FC20	8103		549	J52 CMPA	#03H ;SEÑALA NIVEL QUE SE
FC22	2606		550	BNE	J33 ;ESTA PROCESANDO
FC24	9603		551	LDAA	0003H ;LSB
FC26	5F		552	CLRB	;MSB
FC27	7EFD0F		553	JMP	CH
FC2A	8104		554	J33 CMPA	#04H ;DATO=CICLO PROGRAMADO.
FC2C	2607		555	BNE	J34
FC2E	9607		556	LDAA	0007H ;LSB
FC30	0656		557	LDAB	0056H ;MSB
FC32	7EFD4B		558	JMP	XX
FC35	8105		559	J34 CMPA	#05H ;SEÑALA CICLO QUE SE
FC37	2607		560	BNE	J35 ;ESTA PROCESANDO.
FC39	9605		561	LDAA	0005H ;LSB
FC3B	0652		562	LDAB	0052H ;MSB
FC3D	7EFD0F		563	JMP	CH
FC40	8106		564	J35 CMPA	#06H ;SEÑALA TIEMPO QUE FALTA
FC42	2615		565	BNE	J34 ;DEL NIVEL ACTUAL.
FC44	9609		566	LDAA	0009H ;QUE SI ESTA EN PROCESO
FC46	8106		567	CMPA	#00K ;DE ESTABILIZAR A UNA
FC48	2606		568	BNE	XB ;TEMPERATURA.
FC4A	86H4		569	LDAA	#0H4H ;005H ESTAR EN ESTABIL
FC4C	5F		570	CLRB	

LOCATION	OBJECT CODE	LINE	SOURCE	LINE
FC4D	7EFD4B	571	JMP	XX
FC50	8604F2	572	XB	LDAB 2802 ;MSB
FC53	8604F3	573		LDAB 2803 ;LSB
FC56	7EFD0F	574	JMP	CH
FC59	8111	575	JJ34	CMPL #11H ;DATO=TEMP DE NIVEL 1
FC5B	2607	576	BNE	J35
FC5D	9611	577		LDAB 0011H
FC5F	D610	578		LDAB 0010H
FC61	7EFD4B	579	JMP	XX
FC64	8121	580	J35	CMPL #21H ;DATO=TEMP DE NIVEL 2
FC66	2607	581	BNE	J36
FC68	9613	582		LDAB 0013H ;LSB
FC6A	D612	583		LDAB 0012H ;MSB
FC6C	7EFD4B	584	JMP	XX
FC6F	8131	585	J36	CMPL #31H ;DATO=TEMP DE NIVEL 3
FC71	2607	586	BNE	J37
FC73	9615	587		LDAB 0015H
FC75	D614	588		LDAB 0014H
FC77	7EFD4B	589	JMP	XX
FC7A	8141	590	J37	CMPL #41H ;DATO=TEMP DE NIVEL 4
FC7C	2607	591	BNE	J38
FC7E	9617	592		LDAB 0017H
FC80	D616	593		LDAB 0016H
FC82	7EFD4B	594	JMP	XX
FC85	8151	595	J38	CMPL #51H ;DATO=TEMP DE NIVEL 5
FC87	2607	596	BNE	J39
FC89	9619	597		LDAB 0019H
FC8B	D618	598		LDAB 0018H
FC8D	7EFD4B	599	JMP	XX
FC90	8161	600	J39	CMPL #61H ;DATO=TEMP DE NIVEL 6
FC92	2607	601	BNE	J40
FC94	961B	602		LDAB 001BH
FC96	D61A	603		LDAB 001AH
FC98	7EFD4B	604	JMP	XX
FC9B	8171	605	J40	CMPL #71H ;DATO=TEMP DE NIVEL 7
FC9D	2607	606	BNE	J41
FC9F	961D	607		LDAB 001DH
FCA1	D61C	608		LDAB 001CH
FCA3	7EFD4B	609	JMP	XX
FCA6	8181	610	J41	CMPL #81H ;DATO=TEMP DE NIVEL 8
FCAB	2607	611	BNE	J42
FCAD	961F	612		LDAB 001FH
FCAE	D61E	613		LDAB 001EH
FCB0	7EFD4B	614	JMP	XX
FCB1	8112	615	J42	CMPL #12H ;DATO=TIEMPO DE NIVEL 1
FCB4	2607	616	BNE	J43
FCB5	9631	617		LDAB 0031H
FCB7	D630	618		LDAB 0030H
FCB9	7EFD4B	619	JMP	XX
FCBC	8122	620	J43	CMPL #22H ;DATO=TIEMPO DE NIVEL 2
FCBE	2607	621	BNE	J44
FCB0	9633	622		LDAB 0033H
FC02	D632	623		LDAB 0032H
FC04	7EFD4B	624	JMP	XX
FC07	8132	625	J44	CMPL #32H ;DATO TIEMPO DE NIVEL 3
FC09	2607	626	BNE	J45
FC0B	9635	627		LDAB 0035H

LOCATION	OBJECT	CODE	LINE	SOURCE	LINE
FD44	59		685	ROLB	
FD45	59		686	ROLB	
FD46	59		687	ROLB	
FD47	59		688	ROLB	
FD48	1B		689	HEB	;ACONDICIONA PRIMERO Y
FD49	0B0E		690	LDHB 000EH	;SEGUNDO DIGITOS.
FD4B	0C		691 XX	CLC	
FD4C	59		692	ROLB	;UBICA EL DIGITO EN EL
FD4D	59		693	ROLB	;MSB DEL PUERTO H.
FD4E	59		694	ROLB	
FD4F	59		695	ROLB	
FD50	B/1800		696	STMB PBT	
FD53	B/1802		697	STMB PBT	
FD56	3B		698 XI	RTI	;TERMINA VECTORES DE IRQ.
			699		;*****
			700		;*****
			701		;MAPA DE MEMORIA DE LOS
			702		;VECTORES DE INTERROMPCION
			703	ORG 0FFFFH	
FFF8	FBB9		704	FDB 0FBB9H	;DIR. DE VECTORES DE IRQ.
			705	ORG 0FFFFH	
FFFC	FBB8		706	FDB 0FBB8H	;DIR. DE VECTORES DE NMI.
			707	ORG 0FFFFH	
FFFE	F800		708	FDB 0F800H	;DIR. DE INICIO (RESET).
			709	END	

Errors* 0

CAPITULO V

CIRCUITOS DE INSTRUMENTACION

V.1. CIRCUITO SENSOR DE TEMPERATURA.

Como sensor de temperatura se utilizó un termopar, debido a que el rango de la medición, que es de 20°C a 1000°C, es muy amplio.

El termopar utilizado fue de los disponibles en el Laboratorio de Eléctrica y Electrónica del STC. Para conocer su comportamiento se le realizaron varias pruebas, de las que se obtuvieron los resultados que se presentan gráficamente en la Figura V.1.

Temperatura (°C)	Voltaje (μ V)
25	147
30	347
35	553
40	689
45	872
50	1132
55	1334
60	1538
65	1749
70	1952
75	2158
80	2364
85	2585
90	2747
95	2944
100	3080

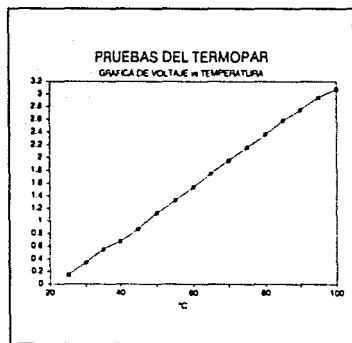


Fig.V.1. Gráfica del comportamiento de la temperatura y voltaje en el termopar.

Podemos observar que la relación entre voltaje y temperatura en el termopar, en el rango de nuestro interés, es prácticamente lineal. Esto nos permitió obtener un modelo matemático utilizando el método de los mínimos cuadrados, que refleja el comportamiento general del termopar. Este es:

$$V = 40.3155 T - 881.135 \quad [\mu V]$$

donde: $V =$ Voltaje y $T =$ Temperatura.

De esta fórmula, podemos observar que se tiene un incremento de 40.3155 ($\mu V/^{\circ}C$).

Debido a que el voltaje de salida del termopar es muy pequeño (μV), se requiere amplificarlo al orden de mV. Para este fin, se utilizó el amplificador de instrumentación LM121 y LM108, de National (Véase la parte A de la Figura V.8.).

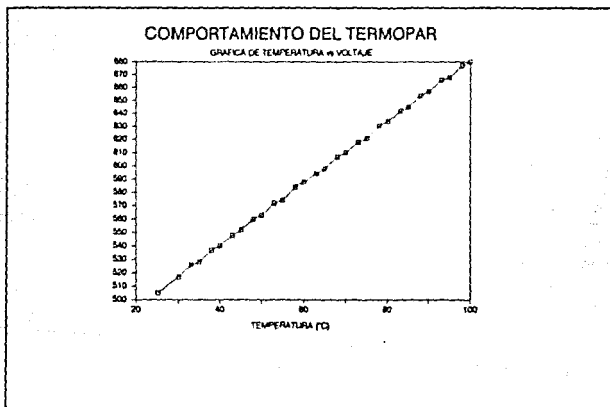


Fig.V2. Gráfica del comportamiento de la señal del termopar, preamplificada al orden de mV.

Realizando mediciones a la salida de este circuito preamplificador se obtuvieron los datos de la tabla, los que gráficamente se presentan en la Figura V.2.

Temperatura (°C)	Voltaje (mV)
25	505
30	517
35	528
40	540
45	552
50	563
55	574
60	588
65	598
70	610
75	621
80	634
85	645
90	657
95	668
100	680
105	691
110	703

Por medio del método de mínimos cuadrados, se modeló el comportamiento de la señal preamplificada por el circuito y se llegó a la siguiente fórmula:

$$V = 2.3313 T + 447.489 \quad [mV]$$

Para pasar la lectura obtenida del termopar y realizar su análisis en el sistema digital, se utilizó un Convertidor Analógico-Digital (ADC).

El circuito seleccionado fue el ADC-1210. Este es un convertidor de 12 bits, lo que nos permite tener una resolución bastante grande. Para 12 bits tenemos 4096 cuentas y si consideramos que una cuenta equivale a 0.25°C , entonces tenemos la capacidad de representar hasta 1024°C .

Por parametros de diseño se estableció que la entrada analógica del ADC-1210 tendrá un rango de 0 a 5V, por lo cuál se tendrá que por cada incremento de 1.22 mV a la entrada de ADC, la cuenta se incrementará en uno. Esto se representa gráficamente en la fig.V.3.

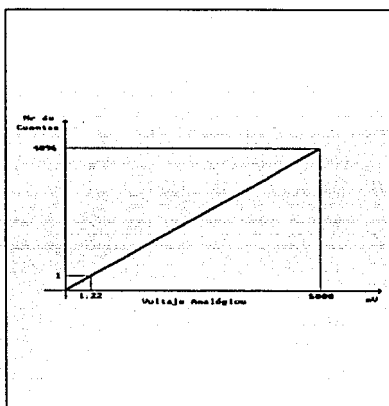


Fig.V.3. Relación entre el número de cuentas y el voltaje analógico de entrada al ADC-1210.

Los parámetros anteriores nos indican que la relación entre voltaje y temperatura tiene que ser de $4.88 \text{ mV}^{\circ}\text{C}$. Para lograr esto, la salida del preamplificador

deberá ser amplificada y posteriormente sumada con un valor de voltaje de tal forma, que elimine el voltaje de offset que este circuito nos entrega.

Para lograr el incremento de $4.88 \text{ mV}^{\circ}\text{C}$, la salida del circuito preamplificador se amplifica por un factor de 2.093, como se muestra en los siguientes cálculos:

$$V = 2.093 (2.3313 T + 447.489) \text{ [mV]}$$

$$V = 4.88 T + 936.59 \text{ [mV]}$$

Con este propósito se diseñó el circuito de la Figura V.4., cuyos cálculos se presentan a continuación:

$$2.093 = (1 + R8/R9)$$

$$R8 = 1.093 R9$$

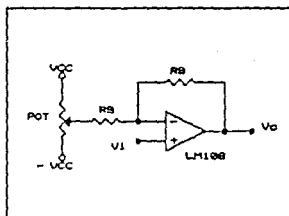


Fig.V4. Circuito amplificador.

En la Figura V.5. se presenta el comportamiento del voltaje de salida de este circuito, con respecto a la temperatura medida por el termopar.

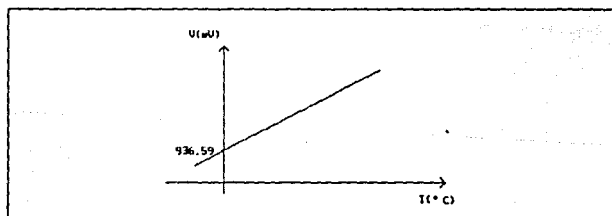


Fig.V5. Gráfica del comportamiento del circuito amplificador.

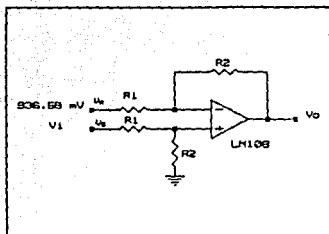


Fig.V.6. Circuito sumador.

El siguiente paso fue el diseño del circuito sumador cuyo diagrama eléctrico se presenta en la Figura V.6. Este circuito se encarga de eliminar el voltaje de offset que nos entregan las etapas anteriores. Este voltaje es de 936.59mV, por lo que fue necesario colocar un divisor de voltaje, ajustable por medio de un potenciómetro de precisión. A continuación se presentan los cálculos referentes a este circuito:

$$V_o = - (R_2/R_1)V_A + [(1 + R_2/R_1) (R_2/(R_1 + R_2))]V_B$$

$$V_o = R_2/R_1 (V_B - V_A) \text{ y si } R_1 = R_2$$

$$V_o = (V_B - V_A)$$

Obteniéndose finalmente que la salida de este circuito se comporta de acuerdo al siguiente modelo matemático :

$$V = 488 T \text{ [mV]}$$

Que es una recta con ordenada al origen de 0 mV tal como se presenta en la Figura V.7.

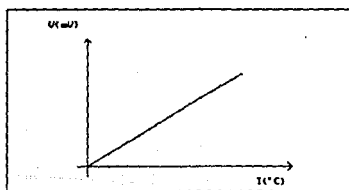


Fig.V.7. Grafica del comportamiento de la se-

Aquí podemos observar que nuestro rango de temperatura está contenido dentro del rango de entrada de voltaje analógico del convertidor, que es de 0 a 5V.

Finalmente, en la Figura V.8. podemos ver el circuito de instrumentación del sensor de temperatura que se implementó en esta tesis.

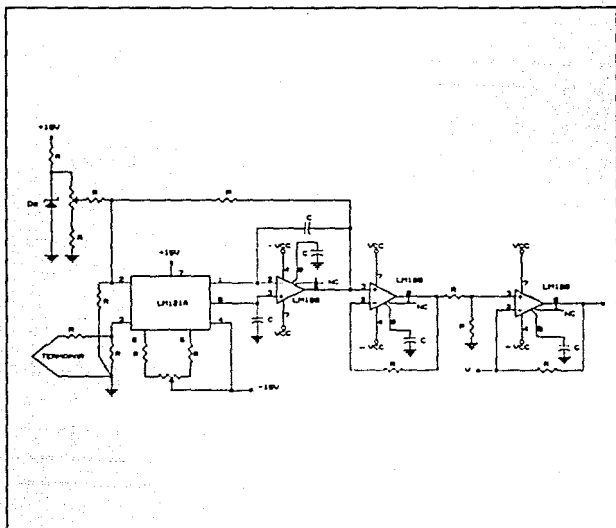


Fig.V8. Circuito de instrumentación del termopar.

V.2. CIRCUITO SENSOR DE CORRIENTE.

Los sistemas de medida empleados para la determinación de las magnitudes eléctricas que intervienen en los circuitos de corriente continua han experimentado una notable evolución, a consecuencia del desarrollo que en la utilización de este tipo de corriente se ha producido en la industria.

Los procesos electrolíticos y electroquímicos, en los cuales se requiere a menudo intensidades de corriente del orden de 100 KA y los accionamientos para las máquinas de productoras de papel, en las que además de los elevados valores de corriente se precisa variar entre amplios límites los valores de los voltajes, son los que mayormente han influido en plantear el problema de las mediciones y los métodos de emplear.

Para la alimentación de este tipo de instalaciones se requieren potencias considerables, que justifican plenamente la instalación de instrumentos de medición de los voltajes, corrientes, potencia y energía.

Como una de las variables que influyen en el control del horno es la corriente, se utilizaron en este trabajo los instrumentos de medición de corriente llamados shunt.

El empleo de los métodos tradicionales, que suponen la utilización para los circuitos amperímetros de shunts de notables dimensiones y para los voltímetros la conexión en los conductores del circuito, presentan a menudo dificultades de ejecución.

Es evidente que la inserción de shunts para fuertes intensidades conlleva una disipación de energía eléctrica que se transforma en calor nada despreciable y los

voltímetros presentan dificultades de seguridad al operador, al existir la posibilidad de ponerse en contacto con los conductores sometidos a tensiones peligrosas. Por lo mismo, se han propuesto y adaptado dispositivos que posibiliten medir la magnitud partiendo de medidas indirectas.

El notable progreso en la producción de materiales magnéticos de altísima permeabilidad y de los materiales semiconductores, ha permitido la producción industrial de los sistemas de medida indirecta, basados en el empleo de los transductores magnéticos y los generadores de Hall.

Los transductores magnéticos, además del amplio campo de aplicación que han hallado en la solución de problemas de regulación, sirven para la medición de voltajes y corrientes continuas, asumiendo funciones de los transformadores de medición.

El efecto Hall se presenta cuando en una barra conductora o semiconductora que lleva una corriente I , es atravesada en forma perpendicular a la corriente por un campo magnético B ; generando una diferencia de voltaje entre las caras paralelas a la dirección del campo.

La creación de este voltaje se debe a la fuerza que produce el producto IB la cual hace que los electrones se desvíen más hacia una cara y la cantidad de electrones desviados depende de las características del material conductor o semiconductor.

De los materiales más sensibles al efecto Hall está el germanio el cual con una densidad de flujo magnético de 100 a 8000 gauss tiene un coeficiente de Hall $K_H = -8.0 \times 10^{-5} \text{ V-cm/Amp-G}$, el telurio que con un flujo magnético de 3000 a 9000 gauss tiene una $K_H = 4.1 \times 10^{-8} \text{ V-cm/Amp-G}$ entre otros.

Valores típicos para estos transductores son los siguientes:

- a) Voltaje de alimentación de 3 V de o ac.
- b) Corriente de alimentación 150mA.
- c) Resistencia de carga 100 Ω .
- d) Sensibilidad de 6 mV/kilogauss a 55mV/kilogauss.
- e) Rango de 0 a 20,000 gauss.
- f) Respuesta en frecuencia del orden de 100kHz.

siendo las aplicaciones más comunes de medidores de flujo, corriente y velocidades angulares.

A continuación se proporcionan algunas características del shunt o transductor de corriente utilizado en nuestro sistema, cuyo funcionamiento esta basado en el principio de efecto Hall.

1. - La relación de salida es de 0.1VDC por cada 10A, bajo las siguientes condiciones:

-carga externa de 50 Ω ; 1 watt en las terminales M y E en donde M es el punto de medición y E la referencia de tierra. (Véase Figura V.9).

2.- Aislamiento de 6KV.

3.- Polarización en las terminales C (+), D(-) y E(tierra) de +18 y -18 volts de corriente directa, tal como se muestra en la Figura V.9.

4.- Resistencia interna de 70Ω

5.- Relación de corriente 1:50.

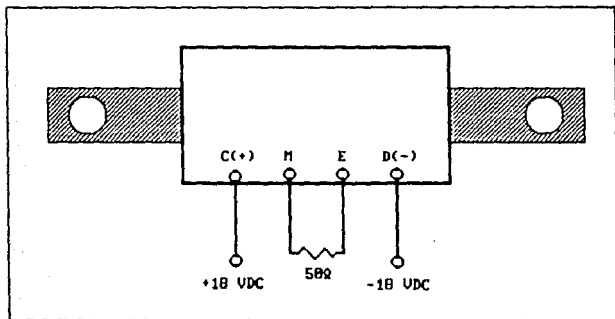


Fig.V.9. Diagrama de conexiones del shunt.

En la Figura V.9. se puede apreciar el diagrama de conexiones del shunt utilizado, y en seguida presentamos una Tabla, en donde podemos apreciar su comportamiento. En la Figura V.10., a su vez, podemos apreciar la Gráfica que representa a esta Tabla.

V_0 V	V_{shunt} mV	$I_0 = V_0/R$ A
0	16.9	0
10	24	0.74
20	31	1.49
30	38	2.23

40	45	2.99
50	52	3.73
60	59	4.48
70	66	5.22
80	73	5.97
90	79	6.71
100	86	7.46
110	93	8.2
120	100	8.96
130	107	9.7
140	114	10.44
150	121	11.19

Utilizando el método de los mínimos cuadrados, encontramos el modelo matemático del comportamiento del shunt que presentamos a continuación:

$$V_{SHUNT} = 10.117I_0 + 14.2683 \quad (\text{mV})$$

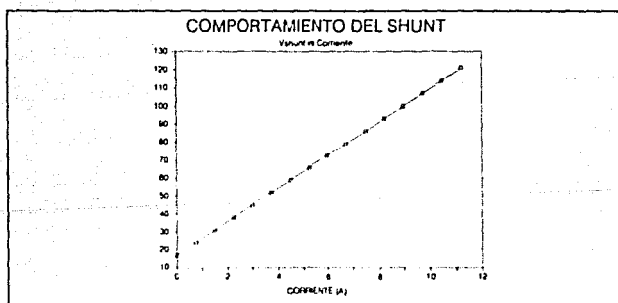


Fig V.10. Gráfica que refleja el comportamiento del shunt.

ANEXO

SENSORES DE TEMPERATURA

Los elementos que sensan la temperatura pueden ser de dos tipos: los de contacto directo y los que detectan las radiaciones del cuerpo a medir.

Los primeros son diseñados para que soporten el mismo nivel de temperatura del objeto a medir, lo cual les limita su rango máximo debido a las oxidaciones que se presentan. Se tienen que encapsular o utilizar métodos de enfriamiento si se quiere elevar el rango.

Algunos de los sensores de contacto directo que proporcionan como salida una señal eléctrica, son los termopares, conductores y semiconductores.

Si el sensor seleccionado es de contacto directo, éste debe de estar lo más unido posible a la masa del material bajo prueba, con el fin de operarlo a su máxima sensibilidad. En caso de medir en estructuras metálicas, lo recomendable es abrir un hoyo e introducir un termopar en forma más o menos forzada.

Sensores conductores

Los cambios de resistencia, debido a los efectos de temperatura que experimentan estos sensores, están dados por la relación:

$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n)$$

donde:

R - Es la resistencia a medir, a la temperatura T.

R₀ - Es la resistencia para T = 0°C.

a_n - Son las constantes propias del material, que se determinan experimentalmente.

En la Figura A.1. se presentan las curvas de la relación de la resistencia a la temperatura de algunos materiales como el níquel, cobre y platino, las cuales nos dan una idea de su sensibilidad. Sus rangos normales de trabajo son: (-320 a 800°F), (-300 a 500°F) y (-450 a 1850°F), respectivamente.

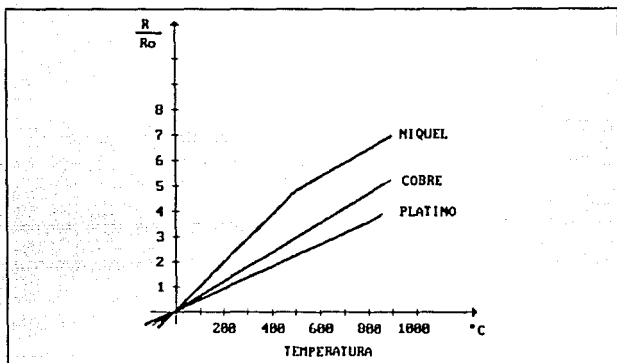


Fig.A.1 Curvas que relacionan la resistencia con la temperatura, en distintos materiales.

Para mediciones de temperatura en líquidos, los elementos sensores van encerrados en un bulbo de acero inoxidable y al descubierto, si el líquido no es corrosivo. Para mediciones en materiales sólidos, los sensores se construyen en forma de rejilla plana o películas.

Su instalación se realiza formando un puente de Wheatstone, donde el principal problema es la alinealidad debido a los grandes cambios de los elementos sensores, por lo cual se recomienda que las resistencias fijas del puente sean 10 veces mayores que la resistencia del sensor.

Los circuitos más recomendados, como acondicionadores de la señal, son los mostrados en las Figuras A.2. y A.3., tomando en cuenta que los cables A y B deben ser idénticos para poder presentar la misma impedancia y sus efectos, por cambios en temperatura o magnetización a lo largo de ellos, se anulan dada la configuración de la conexión.

En la Tabla A.1. se puede observar la resistividad de algunos metales.

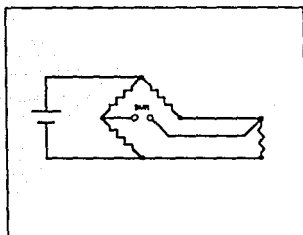


Fig.A.2.

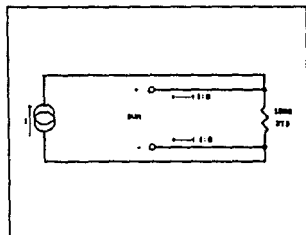


Fig.A.3.

METAL		RESISTIVIDAD Ω/CIRCULAR mil pie
ORO	Au	13.88
PLATA	Ag	8.88
COBRE	Cu	9.26
PLATINO	Pt	59.88
TUNGSTENO	W	38.88
NICKEL	N	36.88

Tabla A.1. Resistividad de algunos materiales.

Sensores semiconductores.

La utilización de elementos semiconductores, como transistores y diodos de silicio o germanio, son los ideales para usarse como sensores de temperatura cuando la liberalidad en rangos de 0 a 100°C es lo importante.

Los sensores semiconductores son conocidos como termistores y están hechos de mezclas, en proporciones adecuadas, de magnesio, níquel y óxido de cobalto. La relación fundamental de la resistencia, con respecto a la temperatura, es¹:

$$R = R_0 \cdot e^{[B(1/T - 1/T_0)]}$$

donde:

R es la resistencia a la temperatura T

R₀ es la resistencia a la temperatura T₀

T es la temperatura absoluta desconocida.

T₀ es la temperatura de referencia a 288°K

El coeficiente de temperatura en la mayoría de los termistores es negativo y está dado por:

$$(dR/dT)/R = -\beta/T^2 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

El rango de operación de estos elementos es del orden de -50 a 200°C. Existen termistores de carbón o silicio que tienen un rango de 1 a 20°K y de germanio, de 0.5 a 100°K.

1 "Metodos Experimentales para Ingenieros", J.P. Holman, Cap. 8, pág. 270, Editorial Mc Graw Hill, 1982, USA.

Su conexión también se realiza en un puente de Wheaststone con una resistencia en paralelo, para disminuir un poco la alinealidad debido a que la resistencia decrece en forma exponencial al aumentar la temperatura.

Su principal ventaja es su alta sensibilidad para controlar pequeños cambios de temperatura. Sin embargo a altas temperaturas se descalibran, por lo que el rango de medición es limitado a pocos cientos de °C.

La Tabla A.2. presenta algunos tipos de termistores y sus características.

TIPO	R A 25°C	TOL	Cte	Coef de temperat
	Ω	%	*K	%%°C a 25°C
TM-D05-100C-153	10	10	3070	-3.5
TM-D05-092C-151	90	20	3100	-3.5
TM-D05-271C-152	270	15	3100	-3.5
TM-D05-471B-153	470	10	3520	-4.2
TM-D05-502A-152	500	15	3900	-4.4
TM-D05-103A-152	10,000	15	4200	-4.9
TM-D05-503A-153	50,000	10	4400	-4.9
TM-D00-100C-151	10	20	3000	-3.4
TM-D00-271A-152	270	15	3000	-4.3

Tabla A.2. Tipos de termistores y sus características.

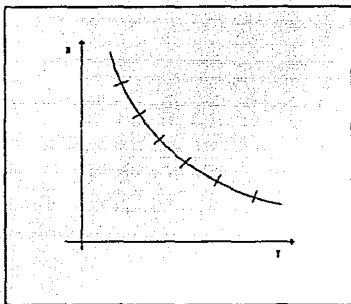


Fig.A.4. Subrangos lineales.

Para utilizar un termistor se deben considerar rangos bajos de medición (0 a 200°C) y puesto que son no lineales, se recomienda trabajarlos en un rango pequeño de tal manera que, para éste, la respuesta sea lineal. Esto lo podemos apreciar en la Figura A.4.

En caso de desear ampliar el sub-rango de medición, se debe conectar en paralelo con una resistencia de precisión.

Sensores de radiación.

Estos sensores operan con radiación electromagnética¹ cuyas longitudes de onda están comprendidas en el rango del espectro visible e infrarrojo, con valor de 0.3 a 0.72 μm y 0.72 a 1000 μm , respectivamente.

El principio de operación se basa en la teoría de que todo cuerpo con temperatura mayor que cero emite radiaciones electromagnéticas que, en su forma ideal, vienen dadas por la ley de Planck, que establece:

1 Metodos Experimentales para Ingenieros*, J.P. Hixman, Cap. 8, pag. 284, Edit. Mc Graw Hill, 1982, USA.

$$W = C_1 / [5(e^{(C_2/T)} - 1)]$$

donde:

W es la intensidad radiante hemisférica espectral, en watts/cm²·u (u=10⁻⁶m)

C₁ = 37413 (watts·u⁴)/cm²

C₂ = 14388 u·°K (longitud de onda de radiación u)

T es la temperatura absoluta a medir, del cuerpo ideal (cuerpo negro)

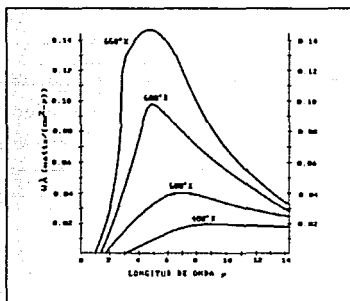


Fig.A.5. Radiación del cuerpo negro.

En la Figura A.5: se muestran las curvas de radiación emitidas por un cuerpo negro, para diferentes longitudes de onda.

Los tipos de sensores que se pueden utilizar son térmicos y de fotones.

Sensores térmicos - Son elementos ennegrecidos, diseñados para absorber el máximo de radiación que llega de todas las longitudes de onda.

Estas radiaciones, posteriormente, se estabilizan para después ser medidas bajo el principio del termómetro de la resistencia, termistor o par termoelectrónico.

Para el caso de los dos primeros, el elemento se construye en forma de película delgada u hojuelas, llamadas bolómetros.

Sensores de fotones - En estos sensores, la radiación incidente libera electrones en la estructura detectora y produce un efecto eléctrico medible. Son fabricados de tal manera que trabajan en un determinado rango de longitud de onda,

obteninédose una mayor velocidad en la respuesta. Estos detectores pueden funcionar como fotoconductores o como fotovoltaicos.

Sensores de cuarzo.

Un método novedoso y que proporciona gran exactitud en la medición de temperatura, es el que se basa en la sensibilidad de la frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo a los cambios de temperatura¹. Si el cristal se corta según un ángulo apropiado, se puede conseguir que la relación de la frecuencia de resonancia con la temperatura sea aproximadamente lineal. Los modelos comerciales de este dispositivo utilizan contadores electrónicos para efectuar la medición de frecuencia y presentan los resultados en forma digital. Se ha publicado que, para mediciones de temperatura absoluta, estos dispositivos alcanzan sensibilidades del orden de 0.001°C. Por otra parte, ya que la medición de temperatura se basa en una medida de frecuencia, este aparato es particularmente insensible al ruido que pudiera captarse a través de los cables conectores.

Termopares.

Los sensores termoelectrónicos funcionan bajo el principio del efecto Seebeck el cual establece que, al conectar dos conductores diferentes, en la unión se crea una diferencia de potencial por efecto de la temperatura. Sin embargo, si por la unión circula una corriente a un circuito externo, en dicha unión se crea una diferencia de potencial, la que expresada en función de la temperatura tiene la relación:

1 "Metodos Experimentales para Ingenieros", J.P. Holman, Cap. 8, pag. 282, Edit. Mc Graw Hill, 1982, USA.

V-H

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$E_1 = C_1 (T_1 - T_2)$$

donde:

E_1 - Es la fem generada por el efecto Peltier.

C_1 - Es una constante, que depende de los materiales.

T_1 y T_2 - Son temperaturas absolutas.

Al mismo tiempo, se genera una diferencia de potencial debido al gradiente de temperatura en los conductores, conocido como efecto Thomson y cuya relación es:

$$E_2 = C_2 (T_1 - T_2)$$

donde:

E_2 - Es la fem debida al efecto Thomson.

C_2 - Es la constante dependiente del material.

Donde la fem total es la combinación de los dos efectos.

Los termopares tienen las siguientes características:

- 1 - La fem total es invariable, para uniones de materiales homogéneos.
- 2 - La fem total es invariable si se inserta un tercer material C en cualquier material, siempre y cuando las nuevas uniones estén a la misma temperatura.
- 3 - De la misma manera, es invariable si el material C es insertado en una unión.

4 - Si la fem de A y C es E_{ac} y de B y C es E_{bc} , entonces la fem de A y B es $E_{ac} + E_{bc}$ ¹.

5 - Si un par produce la fem E_1 cuando sus uniones están a T_1 y T_2 y E_2 cuando están a T_2 y T_3 , la fem $E_1 + E_2$ será para T_1, T_3 .

En la siguiente Tabla A.3. se muestran los pares más comunes y sus características:

TIPO	METAL		COLOR ESTANDAR		COEFICIENTE DE SEEBECK		RANGO °C	ERRORES (MBS) °C
	+	-	+	-	S ($\mu V/^\circ C$)	T ($^\circ C$)		
B	PLATINO RODIO 5%	PLATINO RODIO 30%	---	---	6.8	600	0 a 1820	$0.71 \pm 0.5\%$
E	NICKEL CROMO 10%	CONSTANTAN	VIOLITA	ROJO	58.5	0	-270 a 1000	$0.316 \pm 3\%$ $316 \pm 0.5\%$
J	FIERRO	CONSTANTAN	BLANCO	ROJO	58.2	0	-210 a 760	$0.277 \pm 4\%$ $277 \pm 0.75\%$
K	NICKEL CROMO 10%	NICKEL	AMARILLO	ROJO	39.4	0	-270 a 1372	$0.277 \pm 4\%$ $277 \pm 0.75\%$
R	PLATINO RODIO	PLATINO	---	---	11.5	600	-50 a 1760	$0.530 \pm 2.5\%$ $530 \pm 0.25\%$
S	PLATINO RODIO	PLATINO	---	---	10.3	600	-50 a 1760	$0.530 \pm 2.5\%$ $530 \pm 0.25\%$
T	COBRE	CONSTANTAN	AZUL	ROJO	38.8	0	-270 a 400	$-194 \pm -59 \pm 2\%$ $-59 \pm 93 \pm 1.5\%$ $93 \pm 371 \pm 0.75\%$

1 Métodos Experimentales para Ingenieros*, J.P. Hilmán, Cap. 8, pag. 274, Edit. Mc Graw Hill, 1982, USA.

Además, existen pares especiales para medir temperaturas muy elevadas, como: Rodio-Iridio, con un rango de 0 a 4000°F y sensibilidad de $6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$; Boro-Grafito, con un rango de 0 a 4500°F, con $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y Tungsteno-Renio, para temperaturas de hasta 5000°F y sensibilidad de aproximadamente $6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. En la mayoría de estos casos, se usan técnicas de enfriamiento.

Mediciones con termopar.

Si a un termopar tipo T le tratamos de medir directamente su fem, generada por el efecto de temperatura en la unión cobre-constantan, utilizaríamos la configuración de la Figura A.6. que, de acuerdo a las leyes de comportamiento de termopares, tiene como circuito equivalente el que se presenta en la Figura A.7.

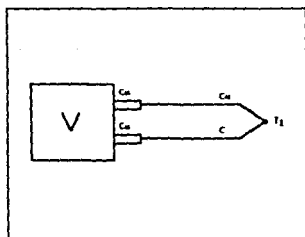


Fig.A.6. Circuito para medir directamente la fem generada por un termopar.

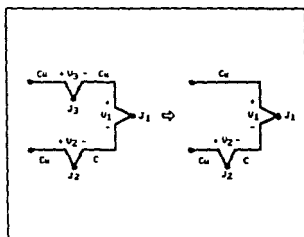


Fig.A.7. Circuito equivalente al que se presenta en la Figura A.6.

El voltaje de interés sería:

$$V = V_1 + V_2 \quad \text{lo cual implica un error de } +V_2.$$

Para minimizar este error, la unión J_2 se debe referenciar a 0°C y la forma más fácil de lograrlo es poniendo la unión en un baño de hielo que, en el mejor de los casos, proporciona una precisión de 0.001°C , tal como se ve en la Figura A.8. Para

referencias de mayor precisión, se recomienda un aparato que proporcione el punto triple del agua, donde se puede obtener 0.0005°C de precisión.

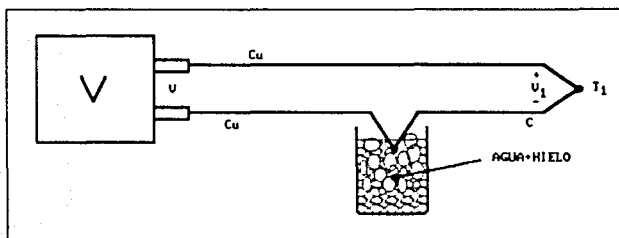


Fig.A.8. Circuito de termopar que proporciona una precisión de 0.001°C

Para mediciones prácticas es difícil usar referencias en baño de hielo, por lo que se recomienda usar blocks isotérmicos, tanto para las uniones con el instrumento de medición como para la referencia (Ver Figura A.9.)

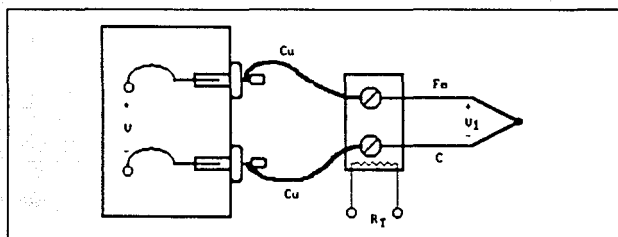


Fig.A.9. Circuito de termopar utilizando un bloque isotérmico.

La temperatura de referencia del block isotérmico es sensada por un termistor u otro transductor de temperatura de alta sensibilidad, para efectos de compensación en las lecturas, siendo configuraciones típicas las de la Figura A.10

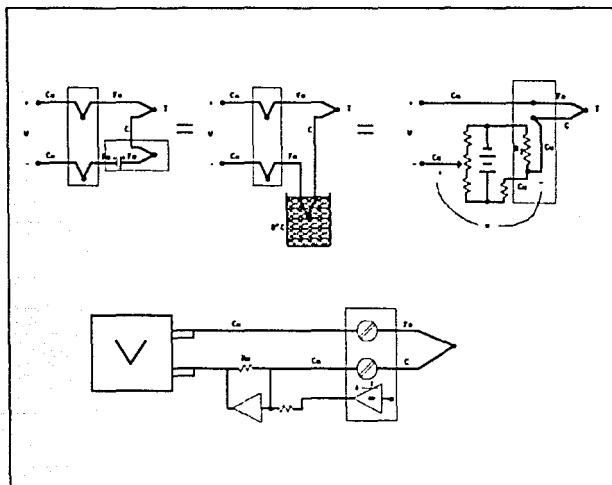


Fig.A.10. Configuraciones típicas de circuitos de termopares, con bloques isotérmicos.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ante la necesidad de cumplir con el objetivo del Laboratorio de Electrica y Electrónica que es el de control de calidad de diversos materiales del STC e industria privada, se diseñó e implementó el control digital de temperatura, con el cual se obtiene una mayor versatilidad en el tipo de pruebas a realizar, ya que se pueden programar diferentes niveles de temperatura con mayor precisión y confiabilidad sin la presencia del operador durante el proceso, lo cual permite realizar pruebas más complejas y variadas.

La versatilidad de nuestro control digital de temperatura nos permite adaptarlo a cualquier horno eléctrico que utilice como calentador una resistencia. Este puede ser de baja o de alta potencia. El control está pensado para hornos que puedan llegar hasta los 1000°C; sin embargo, se puede, utilizar en hornos más grandes realizando pequeñas modificaciones como por ejemplo reemplazar el banco de tiristores para que soporten la potencia requerida y dotar al circuito de disparo de estos con la corriente necesaria para el disparo de ellos. Esto último se logra adicionando otra etapa de potencia antes de los transformadores de aislamiento y cambiando estos por unos de mayor capacidad. El sistema también puede hacerse más económico si la potencia requerida por el horno es más baja. En este caso, únicamente se cambiaría el banco de tiristores por uno de menor potencia y el circuito de disparo se dejaría intacto, ya que éste contaría con capacidad de sobra.

La operación del controlador es sumamente sencilla, por lo que cualquier persona puede aprender rápidamente a manejarlo. Lo que sí se requiere es de cierto cuidado en la instalación del sistema. Esto lo deberá hacer una persona que tenga conocimientos y experiencia en el manejo de corriente trifásica, debido a que la entrada trifásica a nuestro sistema lleva una cierta secuencia entre las fases la que se encuentra debidamente marcada. Si la persona no tiene conocimiento sobre este aspecto puede equivocar la secuencia, lo cual provocará que el sistema no

trabaje correctamente y no esté entregando la potencia requerida. Por otro lado, una vez conectado en forma correcta, el sistema es bastante confiable y seguro en lo que se refiere a posibles descargas o cortos, ya que se puso especial cuidado en aislar y fijar cuidadosamente todos los componentes. Para lograr esto en la forma más óptima posible se diseñó y construyó un mueble especialmente para el alojamiento de nuestro sistema de control.

Finalmente agradecemos el apoyo que nos proporcionó el Sistema de Transporte Colectivo en cuanto a la asesoría, material y equipo para el desarrollo de este proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- Berlin, *Medición de Corrientes*, Editato por Siemens.
- Bossi A., *Mediciones de Corriente Continua*, Edit. Prentice Hall.
- Dewan S.B., *Power Semiconductor Circuits*, Edit. John Wiley and Sons.
- Dobelin J., *Instrumentación Electrónica*, Edit. Mc Graw Hill.
- ECG Semiconductor *Master Replacement Guide*.
- Electronic Informations Series, *Thyristor Data Book*, Cordura Publications.
- Electronic Informations Series, *Transistor Data Book*, Cordura Publications.
- Ellenwood B., *Heat Power Engineering*, Edit. John Wiley and Sons.
- Gilchrist A., *Hornos*, Edit. Alhambra-España.
- Hewlett Packard, *Measurment of Temperatures*.
- Hewlett Packard, *Cross Assambler and Linker 6802*, Operation Handbook.
- Hewlett Packard, *64211 Emmulation Control*, Service Manual
- Hewlett Packard, *64151 Emmulation Memory Control*, Service Manual.
- Hewlett Packard, *Operating Systems and Editor for HP64000*, Operation Hand-book.

Hewlett Packard, *PROM Programmer*, Operation Handbook.

Holman J.P., *Métodos Experimentales para Ingenieros*, Edit. Prentice Hall.

Lilen H., *Tiristores y Triacs*, Edit. Marcombo.

Motorola, *Microprocessor, Microcontroller and Peripheral Data*.

National Semiconductor, *Linear Application Handbook*.

National Semiconductor, *Memory Data Book*.

National Semiconductor, *MOS/LSI Data Book*.

National Semiconductor, *TTL Data Book*.

Powerex, *Phase Control SCRs*, Power Semiconductor Data Book.

Ramshaw R., *Electrónica de Potencia*, Edit. Marcombo.