

2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PARA LOS HORNOS DE PRUEBA EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA AREA ELECTRICO-ELECTRONICO

P R E S E N T A N : HEDEN MARTINEZ ESTRADA RICARDO HERNANDEZ ORTIZ



CIUDAD UNIVERSITARIA MEXICO, D. F. 1999.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

269646



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 esta 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.

PAGINAFIACION

DISCONTINUA

## *Agradecimientos*

*Agradecemos muy sinceramente a todos los profesores que formaron parte de nuestro desarrollo profesional y muy especialmente a:*

*Eng. Miguel Ángel Cruz León director de nuestra tesis, por su ayuda y tiempo brindados.*

*Eng. Enrique Arenas Sánchez por su invaluable amistad, ayuda y confianza, con cariño y respeto.*

*Eng. Antonio Salvá Palleja, por su colaboración y tiempo dedicado.*

*Todos los integrantes del Departamento de Cálculo por brindarnos su apoyo y confianza*

*Eng. Margarita Ramírez Galindo, por el constante apoyo.*

*Nuestros padres y familiares por su fe, paciencia y amor depositados en nuestros corazones.*

*Eng. Jorge Acevedo por su invaluable apoyo en la realización de este trabajo.*

*Y muy especialmente a nuestra Universidad y a la Facultad de Ingeniería por darnos la oportunidad y el apoyo de formarnos como profesionistas.*

*Hedén Martínez Estrada.*

*Ricardo Hernández Ortiz*

*Ma Concepción Estrada de Martínez*

*A la memoria de la luz que me dio la vida,  
porque todo aquello que aprendí, la alegría y  
la lucha por vivir se la debo toda a ella  
"mi mamacitus"*

*Gracias por confiar en "tu niña".  
Su recuerdo y amor lo llevaré siempre en mi corazón.*

*Hedén Martínez Estrada.*



## *Dedicatorias*

*A mi padre Luis Martínez Patiño, por su gran amor, cuidado, enseñanza y ayuda incondicional.*

*A mis hermanos, por su apoyo y consejos, y en especial por darme toda su confianza y amor, Juan, Joel, Benito, Lety, Susy y Myrna.*

*A mis cuñadas y cuñados, por su cariño y apoyo.*

*A todos mis sobrinos, por su invaluable ternura y amor.*

*A Nancy, por ser parte de la misma esencia y estar siempre junto a mí.*

*A Ricardo Hernández Ortiz, gracias por hacer posible este sueño juntos, por el apoyo y por esa maravillosa amistad.*

*A Víctor Manuel por el brillo de tu luz, por el aire de tu amor, apoyo y fe, que me han dado la inspiración de seguir.*

*A todos mis amigos y amigas que están junto a mí (y a los que no están) que forman y apoyan mi vida personal, deportiva y profesional.*

*Adriana Sandoval, Rosalba, Adriana, Georgina, Iris,  
Alejandra, Lorena, Myrna, Jorge, Silvia y Héctor,  
Sergio Hernández, etc.*

*Hedén Martínez Estrada.*

*Agradezco a:*

*Mi padre celestial, Dios, por haberme permitido llegar hasta aquí, él sabe que el camino no ha sido fácil, pero, nada es fácil en esta vida.*

*Mis padres, Teresa y Ángel su apoyo y enseñanzas han sido la mejor herencia que me han podido dar, y este logro aunque pequeño aún, es de los tres.*

*Mi hermano, Leonardo Hernández Ortiz, aunque muchas cosas nos han separado los últimos años, y físicamente somos distintos, tenemos dos cosas en común, la sangre, y el impetu para lograr grandes cosas en la vida.*

*Mi familia, es difícil nombrarlos a todos y a la vez no quisiera por error omitir a alguien, pero todos ustedes saben que son parte esencial en mi vida.*

*Hedén Martínez,, por ser parte de este sueño, que ahora se materializa, una gran compañera de trabajo y una excelente compañera de la vida.*

*Verónica Flores García, por su apoyo incondicional en la revisión del trabajo, pero más aún por ser parte fundamental de mi vida.*

*Mis amigos Ceoy, Rodrigo, Miguel, Marcos, Gerardo, etc. gracias por todos los momentos que compartimos, buenos y malos han sido parte de una vida y crecimiento, ojalá y dure esta gran amistad*

*Todas aquellas personas que por olvido no mencione, pero que han estado a mi lado, y por todos los que dudaron, y nunca confiaron en mi, en buena parte esto también es su logro.*

*Ricardo Hernández Ortiz.*

	<b>Página</b>
Índice.....	i
Introducción.....	vi

---

## **Capítulo 1 Conceptos de Medición y transductores**

1.1 Conceptos de medición.....	1
1.1.1 Precisión y exactitud.....	2
1.1.2 Resolución y sensibilidad.....	3
1.1.3 Tipos de errores.....	4
1.1.3.1 Errores graves.....	5
1.1.3.2 Errores sistemáticos.....	6
1.1.3.3 Error dinámico.....	7
1.1.3.4 Errores estáticos.....	7
1.1.3.5 Errores aleatorios.....	8
1.2 Transductores.....	8
1.2.1 Dispositivos de detección y transductores.....	8
1.2.2 Transductores de temperatura.....	9
1.2.2.1 Termómetro.....	9
1.2.2.2 Termistor.....	10
1.2.2.3 Termopares.....	11
1.2.2.4 Termostato.....	17
1.2.2.5 Pirómetro óptico.....	19
1.2.2.6 Termómetros especiales.....	19
1.2.2.7 Transductores electrónicos.....	19
1.2.3 Precisión de las medidas.....	23
Conclusión.....	24

---

## Capítulo 2 Teoría de control y temperatura

2.1	Control.....	25
2.1.1	Concepto de control.....	26
2.1.2	Realimentación .....	28
2.1.2.1	Definición de sistema y concepto de estado.....	30
2.2	Clasificación de los sistemas dinámicos.....	32
2.2.1	Linealidad.....	33
2.2.2	Invarianza con el tiempo.....	35
2.3	Acciones básicas de control.....	35
2.3.1	Clasificación de los controles automáticos.....	35
2.3.1.1	Control on/off (o de dos posiciones).....	36
2.3.1.2	Control proporcional (P).....	37
2.3.1.3	Control integral (I).....	40
2.3.1.4	Control proporcional e integral (PI).....	42
2.3.1.5	Control proporcional derivativo (PD).....	48
2.3.1.6	Control proporcional integral derivativo (PID).....	55
2.4	Modelado de sistemas térmicos.....	58
2.4.1	Procedimiento para modelar un sistema.....	60
2.5	Temperatura.....	60
2.5.1	Escalas de temperatura.....	61
2.5.2	Tranferencia de calor.....	62
2.5.2.1	Conducción.....	62
2.5.2.2	Convección.....	63
2.5.2.3	Radiación.....	64
	Conclusión.....	67

---

## Capítulo 3 Descripción del Microcontrolador

3.1	Historia del microprocesador.....	70
3.2	Microprocesador.....	70
3.3	Arquitectura de los microprocesadores.....	71
3.4	Fabricación de microprocesadores.....	71
3.5	Microcontrolador.....	74
3.5.1	Canal de direcciones.....	75
3.5.2	Canal de datos.....	76
3.5.3	Canal de control.....	77
3.6	Descripción del Microcontrolador M68HC11.....	77
3.7	Descripción de terminales del M68HC11E9.....	80
3.8	Unidad Central de Proceso (CPU - Central Process Unit).....	84
3.8.1	Registro y Contadores.....	85
3.8.2	Unidad aritmética lógica.....	86
3.8.3	Circuitería de tiempos y control.....	87
3.9	Memorias internas.....	89
3.10	Puertos de entrada y salida.....	89
3.11	Convertidor Analógico-Digital (A/D).....	92
3.12	Conjunto de instrucciones.....	96
3.12.1	Instrucciones de registro / memoria.....	96
3.12.2	Instrucciones de lectura-modificación-escritura.....	98
3.12.3	Instrucciones de bifurcación.....	99
3.12.4	Interrupciones de control.....	100
3.12.5	Instrucciones de manipulación de bits.....	101
3.13	Tecnologías futuras.....	101
	Conclusión.....	103

---

---

## Capítulo 4 Etapa de potencia

4.1	Elementos de potencia.....	104
4.1.1	Diodos.....	104
4.1.2	Tiristores.....	105
4.1.3	<i>Rectificadores Controlados por Silicio</i> .....	106
4.1.3.1	Operación básica.....	106
4.1.3.2	Estado de corte del SCR.....	108
4.1.3.3	Estado de conducción del SCR.....	109
4.1.3.4	Métodos para desactivar un SCR.....	110
4.1.3.5	Características y valores nominales del SCR.....	112
4.1.4	Triac.....	113
4.1.4.1	Características de salida del triac.....	114
4.1.4.2	Triac como interruptor de corriente alterna.....	117
4.1.4.3	Adecuada velocidad de crecimiento.....	118
4.1.4.4	Circuito de triac para dimmer.....	118
4.1.4.5	Principio de gobierno del triac.....	120
4.1.4.6	Varias lámparas incandescentes conectadas al mismo dimmer...	122
4.2	Protección contra sobrecorrientes.....	123
4.2.1	Protección por fusible y disyuntor rápido.....	124
4.2.2	Protección contra sobretensiones.....	126
4.2.2.1	Protección contra las sobretensiones internas mediante circuito RC.....	126
4.2.2.2	Protección contra las sobretensiones externas mediante circuito RC.....	126
4.2.2.3	Protección contra las sobretensiones mediante semiconductores.....	127
4.3	Variadores de corriente alterna.....	127
	Conclusión.....	128

---

---

## Capítulo 5 Diseño del circuito

5.1 Teclado.....	129
5.2 Sincronización con la red eléctrica.....	131
5.3 Etapa de potencia.....	132
5.4 Sensores de temperatura.....	134
5.5 Display.....	137
5.6 Paneles con focos.....	138
5.7 Resultados.....	139
Conclusión.....	143

---

## Capítulo 6 Diseño del programa

6.1 Programación.....	144
6.1.1 Compiladores.....	146
6.2 Pseudocódigo del programa.....	146
6.3 Diagramas de flujo.....	148
6.4 Listados de los programas.....	155
Conclusión.....	174

---

Conclusiones.....	175
-------------------	-----

---

Apéndice .....	I
----------------	---

---

Bibliografía.....	IX
-------------------	----

---

## Introducción

---

La fabricación de partes de automóviles y el ensamblaje de partes manufacturadas dependen de las técnicas de producción en masa en las cuales las mediciones y el control constituyen puntos vitales. Las compañías automotrices tienen muchos abastecedores y han establecido muchas de sus propias plantas de fabricación de partes y armadoras en localidades extremadamente separadas. En sus diseños han establecido márgenes de tolerancia que deben mantenerse para que los componentes se puedan ensamblar y sea posible obtener una unidad que funcione en forma correcta y tenga mucha demanda. Las partes de automóviles incluyen plástico inyectado, aluminio, hierro, acero, telas, vidrio, hule, pintura entre otros materiales.

Todas las unidades acabadas pasan por una inspección final que, por lo común, concuerdan con una base estadística. En la Figura 1 se muestra un diagrama a bloques del tipo de pruebas que se realizan.

Dentro del tipo de pruebas que se realizan a las unidades terminadas se encuentran dos tipos:

*Dinámicas*: que incluyen pruebas de vibración, resistencia a golpes, la marcha cómoda, la facilidad de conducción etc.

*Estáticas* que incluyen la prueba de ruido, y la de temperatura. Esta última se basa en un horno, en el cual se introduce el auto terminado, se le aplica una temperatura uniforme verificando de esta forma las partes que conforman el automóvil.

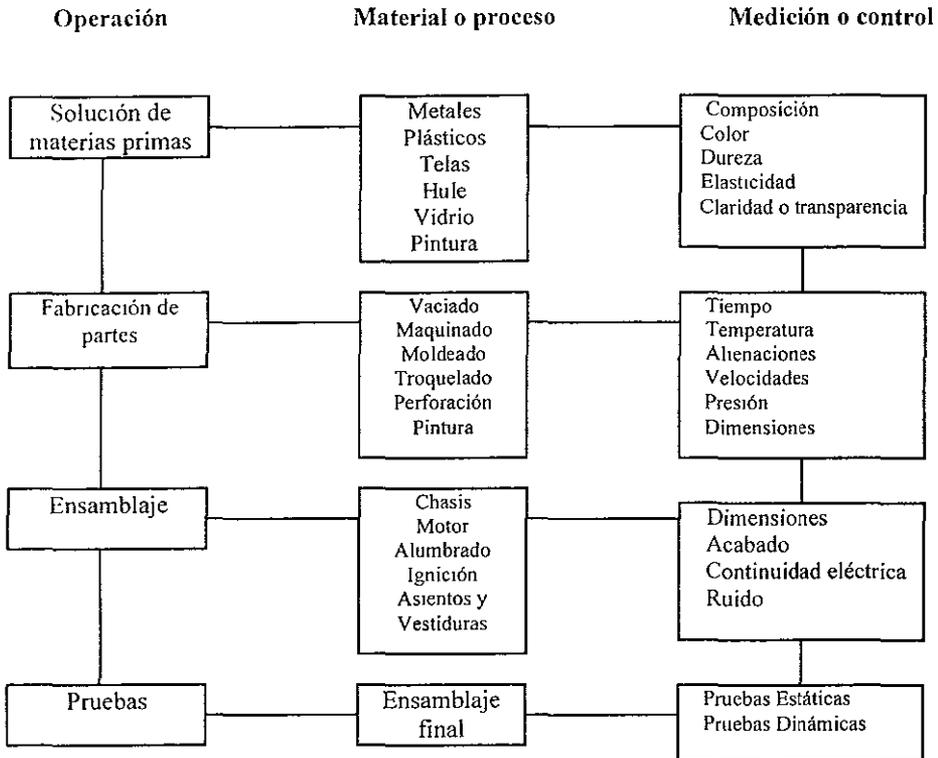


Figura 1 Pruebas en la industria automotriz.

Actualmente el sistema, consiste en introducir una unidad terminada en un horno con seis paneles con focos, los cuales mantienen una temperatura más o menos homogénea; se requiere que un operario verifique en todo momento la temperatura de cada panel por medio de termómetros, que se encuentran en un panel de control externo, y de esta forma poder modificar con un potenciómetro cada panel, lo cual hace poco eficiente el control de temperatura, debido a errores humanos

La presente tesis consta únicamente del diseño de un horno para la prueba estática de temperatura, en donde se tiene una temperatura constante que se puede ajustar a un valor deseado para las diferentes pruebas que se lleven a cabo, como puede ser aire acondicionado, que independientemente de una temperatura exterior al vehículo, este conserve en su interior una temperatura deseada, las pruebas a la pintura, es decir que no se quemé o se dañe a ciertas temperaturas. pruebas de partes plásticas, en la cual se desea que estas partes no pierdan su color, textura, firmeza, dimensiones y resistencia a impactos.

Para lograr el objetivo deseado, se piensa utilizar una cámara térmica que sea capaz de conservar una temperatura, la cual por el momento no se diseñará (por no ser parte fundamental de la tesis), el material con que está construida no es de gran importancia ya que el controlador de temperatura debe mantener una temperatura uniforme en el interior de la cámara. Para los fines en los que se utilizará son deseables las siguientes características físicas, de tal forma que podamos introducir el vehículo completo.

La cámara térmica tendrá seis paneles de focos que proporcionaran el calor necesario para mantener la temperatura en el interior del horno, a su vez la temperatura que proporcione cada panel será sensada por un termopar, lo cual implica que tendremos seis puntos diferentes de medición en el horno, con lo que se garantiza que la temperatura es uniforme en el interior de éste.

El control de la temperatura en la cámara se basa en el siguiente diagrama de control de lazo cerrado o con realimentación. Figura 2.

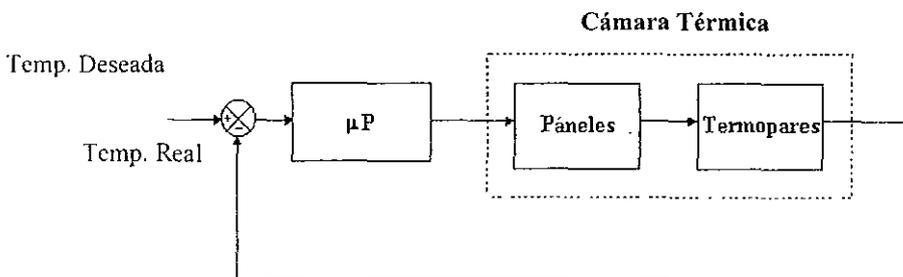


Figura 2 Diagrama de Control

La señal eléctrica que entrega el termopar es acondicionada y enviada a un microprocesador ( $\mu P$ ) que se encargará de procesar esa información y enviar una señal de mando para corregir el posible error que exista entre la temperatura real y la deseada, es en este punto donde mayor importancia tiene el sistema, pues este debe de ser capaz de recibir los seis puntos de la señal, procesarlos y enviar las respuestas a cada panel.

La señal que manda el procesador para controlar cada panel no es lo suficientemente potente como para poder ser enviada directamente, sino que esta debe ser acondicionada para poder ser recibida en el panel, este acondicionamiento consiste, primeramente en aislar las dos etapas, la de control y la de potencia, esto para protección tanto del sistema como de los operadores. Posteriormente se procede a amplificar la señal, en voltaje y corriente, con lo cual logramos un incremento considerable de la potencia que será enviada a cada panel de focos, la potencia que recibirá es proporcional a la señal de mando del  $\mu C$ , es decir, si el  $\mu C$  manda una señal para aumentar la temperatura en cierto panel, la potencia que este recibirá será de mayor magnitud a la que tenía.

Por último el panel responderá a la potencia enviada convirtiendo la energía en luz y calor el cual servirá para controlar la temperatura en el horno, esta temperatura será nuevamente sensada por el termopar que enviará la señal al  $\mu C$  cerrando de esta forma el lazo de control.

# Capítulo 1

## Concepto de medición y transductores

---

En este capítulo mencionaremos algunos conceptos básicos de medición que agregaremos a su vez al lenguaje utilizado en la presente tesis, revisaremos también las diferencias que existen entre ciertos términos empleados, así como los posibles errores que son factibles de encontrar al momento de realizar alguna medición y la forma en que los podemos reducir.

Por otro lado mencionaremos algunos transductores existentes en el mercado, sus características, compararemos las ventajas y desventajas que nos representa utilizar cada uno de ellos y concluiremos en la elección de un transductor, para cumplir con el objetivo principal de esta tesis, y con el prototipo que se utilizará en las pruebas a escala.

### 1.1 Conceptos de medición

Desde que el hombre es racional, y después de haber cubierto sus necesidades básicas, se inició en una búsqueda por descubrir todo aquello que lo rodea, darle un sentido y relacionarlo, es así como llamó a las cosas por el nombre con que ahora las conocemos, y les asignó una medida de comparación con un estándar que él propuso y es así como nace la medición.

Galileo (1564-1642), el célebre físico y astrónomo, dijo: *“medir lo que es medible y tratar de hacer medible lo que todavía no lo es”*. Y desde que el genial italiano inventó el

termómetro hasta nuestros días, este aforismo ha marcado la pauta de innumerables actividades del hombre, muy especialmente en el campo de las ciencias experimentales.

Casi tres siglos después, el notable físico inglés Kelvin (1824-1907) afirmó: *“Cuando se puede medir aquello de lo que se habla y expresarlo en números, puede decirse, entonces, que se posee algún conocimiento de ello”*.

Medir es obtener una relación de correspondencia entre lo que se quiere conocer y ciertas unidades convencionales.

### 1.1.1 Precisión y exactitud

En el análisis de mediciones a menudo se mal interpretan las palabras exactitud y precisión, y se emplean en forma incorrecta. Aunque se considera que tienen el mismo significado, hay una diferencia entre sus definiciones, cuando se usan para descripción de mediciones experimentales.

La **exactitud** de una medición, especifica la diferencia entre el valor medido y el valor real de una cantidad. La desviación del valor verdadero, es un índice de que tan exactamente se ha llevado a cabo una lectura. Por otro lado, la **precisión**, especifica la repetibilidad de un conjunto de lecturas, realizada cada una en forma independiente con el mismo instrumento. Se determina una estimación de la precisión mediante la desviación de la lectura con respecto al valor promedio. Un ejemplo que muestra la diferencia entre exactitud y precisión es cuando se tiene un instrumento con un defecto en su funcionamiento; el instrumento puede estar dando un resultado que es altamente repetible de medición a medición, pero alejado del valor deseado. Los datos obtenidos en este instrumento serían de alta precisión pero muy inexactos. También puede ser que dos instrumentos den lecturas que son igualmente precisas, pero que difieran en exactitud debido a diferencias en el diseño de los instrumentos. Estos ejemplos subrayan que la precisión no garantiza la exactitud, aunque la exactitud necesita de la precisión.

### ☞ **Precisión**

Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces en las mismas condiciones (ambientales, operador, etc.).

### ☞ **Exactitud**

El concepto de exactitud, cuando se aplica a instrumentos que muestran una lectura mediante el empleo de una escala y una aguja, se refiere por lo general al valor de su escala completa (a menos que se especifique otra cosa). Cuando se dice que la exactitud de un medidor es de 1 por ciento, esto significa que una lectura que se tome en cualquier lugar de sus escalas no tendrá error mayor que el 1 por ciento del valor de la escala completa.

La exactitud digital se especifica generalmente, como un porcentaje de más o menos de la lectura más un bit del dígito menos significativo (por ejemplo,  $\pm 0.05$  por ciento de la escala completa FS -Full Scale-  $\pm 1$  bit). La exactitud puede cambiar al seleccionarse distintos rangos. También se tiene generalmente un rango específico de temperatura en que el fabricante garantiza la exactitud declarada.

## **1.1.2 Resolución y sensibilidad**

### ☞ **Resolución**

La resolución es el significado del dígito menos significativo (LSD Lower Significant Digit). Por ejemplo, el rango de un medidor de temperatura digital que muestra tres dígitos en escala de 0 °C a 100 °C, podrá decirse entonces, que tiene una resolución de un grado o del uno por ciento.

## ☞ Sensibilidad

La sensibilidad o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida. Para un sensor cuya salida está relacionada con la entrada  $x$  mediante la ecuación  $y = f(x)$ , la sensibilidad en el punto  $x_a$ ,  $S(x_a)$ , es

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}$$

En los sensores interesa tener una sensibilidad alta y, si es posible, constante. Para un sensor con respuesta

$$y = kx + b$$

La sensibilidad es  $S = k$ , para todo el margen de valores de  $x$  aplicables. Para uno cuya respuesta sea

$$y = kx^2 + b$$

La sensibilidad es  $S = 2kx$ , y varía a lo largo de todo el margen de medida.

### 1.1.3 Tipos de errores

Los errores se presentan en todos los experimentos. Son inherentes al acto mismo de la medición. La descripción de cada medición debe incluir un intento de evaluar las magnitudes y las fuentes de los errores. Por lo que un primer paso para reducir los errores es la conciencia de su existencia y su clasificación en grupos generales. Si se diseña bien y se lleva a cabo con cuidado un experimento, en muchas ocasiones se pueden reducir los errores a un nivel en que sus defectos sean menores que el máximo aceptable.

## ☞ Error

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.

Los errores pueden provenir de diferentes fuentes y por lo general se clasifican en las siguientes categorías:

- a) Errores graves.
- b) Errores sistemáticos.
- c) Error dinámico.
- d) Errores estáticos.
- e) Errores aleatorios.

### 1.1.3.1 Errores graves

Se deben principalmente a fallas humanas en la lectura o en la mal utilización de los instrumentos, así como en el registro y cálculo de los resultados de las mediciones. Cuando el hombre participa en las mediciones, se cometen inevitablemente algunos errores graves. Aunque probablemente es imposible la eliminación total de estos se debe intentar anticiparlos y corregirlos. Algunos de estos errores se detectan con facilidad pero otros son muy evasivos. Un error común y frecuente es el uso inapropiado de un instrumento. En general, las condiciones de funcionamiento de los instrumentos cambian cuando se conectan de algún modo inapropiado. Por ejemplo, un termómetro bien calibrado puede dar una lectura errónea cuando se instala en contacto con algún metal, ya que entonces dará una lectura inapropiada por estar con un material de baja resistencia al calor y el valor medido será cercano a la temperatura del metal y no del ambiente.

Un gran número de errores es atribuido a descuidos o malos hábitos, como lecturas inapropiadas de un instrumento, registro de los resultados en forma diferente a las lecturas obtenidas o ajuste incorrecto de los instrumentos. Otro error grave puede ocurrir cuando el

instrumento no está ajustado a cero antes de tomar la medición; entonces todas las lecturas estarán incorrectas.

Errores como estos no se pueden tratar en el ámbito matemático; se evitan teniendo cuidado en la lectura y registro de los datos de medición. Una buena práctica es efectuar más de una lectura de la misma cantidad, de preferencia por diferentes observadores.

### 1.1.3.2 Errores Sistemáticos

Se dividen en dos categorías:

#### ⚡ *Errores instrumentales.*

Este tipo de errores es inherente a los instrumentos de medición, se deben a fallas por partes defectuosas o gastadas, y efectos ambientales sobre el equipo.

Las fallas en los instrumentos se pueden detectar verificando si hay comportamiento errático, así como la estabilidad y repetibilidad de los resultados. Una forma rápida y fácil de verificar un instrumento es compararlo con otro de las mismas características o con uno más exacto.

Los errores instrumentales se pueden evitar:

- 1) Al seleccionar el instrumento adecuado para la medición en particular.
- 2) Al aplicar los factores de corrección después de definir la cantidad del error instrumental.
- 3) Al calibrar el instrumento con un patrón.

### ☞ *Errores Ambientales*

Los errores ambientales se deben a las condiciones externas que afectan la operación del dispositivo de medición incluyendo las condiciones del área circundante al instrumento.

Para evitar lo más posible este tipo de errores es conveniente que el instrumento de medición, este en algún lugar adecuado, para que los factores ambientales alteren lo menos posible dicha medición,

#### **1.1.3.3 Error Dinámico**

Este se presenta ya que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato.

Este error es conocido como la diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento.

La forma más adecuada de disminuir este error es utilizando componentes de respuesta rápida para mediciones de alta precisión, o por otro lado retardar la lectura proporcionada hasta que se establezca su valor.

#### **1.1.3.4 Errores Estáticos**

Se presenta cuando el proceso está en condiciones de régimen permanente. La mejor forma de disminuir el efecto de este error, es compensar de alguna forma el instrumento de medición, cuando se conoce el factor de error.

### 1.1.3.5 Errores Aleatorios

Se deben a causas desconocidas y ocurren incluso cuando todos los errores sistemáticos se han considerado. En experimentos bien diseñados por lo general se presentan pocos errores aleatorios, pero llegan a ser importantes en trabajos de gran exactitud.

No existe forma alguna de predecir, y por lo tanto controlar este tipo de errores, incluso en ocasiones es difícil detectar la fuente que ocasiona este tipo de errores, conocido en electrónica como ruido.

## 1.2 Transductores

### 1.2.1 Dispositivos de detección y transductores

La medición de magnitudes mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas se realiza empleando dispositivos denominados sensores y transductores.

#### ⇒ Sensor

El sensor cambia alguna de sus propiedades en función de la magnitud a medir, como una temperatura, una posición o una concentración química.

#### ⇒ Transductor

Dispositivo al que se aplica una energía de entrada y devuelve una energía de salida; esta energía de salida suele ser diferente al tipo de energía de entrada. Por ejemplo, en un medidor de temperatura una espiral metálica convierte la energía térmica aplicada, en el movimiento mecánico de la aguja del marcador. Debido a la facilidad con la que se transmite y amplifica la energía eléctrica, los transductores más utilizados son los que convierten otras formas de energía, como calor, luz o sonido, en energía eléctrica. Algunos ejemplos son los micrófonos, que convierten la energía sonora en energía eléctrica; los materiales

fotoeléctricos, que convierten la luz en electricidad, y los cristales piroeléctricos, que convierten calor en energía eléctrica.

Los sensores y transductores pueden funcionar en ubicaciones alejadas del observador, así como en entornos inadecuados o impracticables para los seres humanos.

Algunos dispositivos actúan de forma simultánea como sensor y transductor. Un termopar consta de dos uniones de diferentes metales que generan una pequeña tensión que depende del diferencial térmico entre las uniones. El termistor es un reóstato especial, cuya resistencia varía según la temperatura. Un reóstato variable puede convertir el movimiento mecánico en señal eléctrica. Para medir distancias se emplean condensadores de diseño especial, y para detectar la luz se utilizan fotocélulas. Para medir velocidades, aceleración o flujos de líquidos se recurre a otro tipo de dispositivos. En la mayoría de los casos, la señal eléctrica es débil y debe ser amplificada por un circuito electrónico.

### **1.2.2 Transductores de temperatura.**

Hay varios tipos de dispositivos que se utilizan para medir la temperatura. El requisito fundamental es que empleen una propiedad fácil de medir (como la longitud de una columna de mercurio) que cambie de forma marcada y predecible al variar la temperatura. Además, el cambio de esta propiedad termométrica debe ser lo más lineal posible con respecto a la variación de temperatura. En otras palabras, un cambio de dos grados en la temperatura debe provocar una variación en la propiedad termométrica dos veces mayor que un cambio de un grado, un cambio de tres grados una variación tres veces mayor, y así sucesivamente.

#### **1.2.2.1 Termómetro**

Instrumento empleado para medir la temperatura. El termómetro más utilizado es el de mercurio, formado por un capilar de vidrio de diámetro uniforme comunicado por un extremo con una ampolla llena de mercurio. El conjunto está sellado para mantener un vacío parcial en

el capilar. Cuando la temperatura aumenta el mercurio se dilata y asciende por el capilar. La temperatura puede leerse en una escala situada junto al capilar. El termómetro de mercurio es muy usado para medir temperaturas ordinarias; también se emplean otros líquidos como alcohol o éter.

La invención del termómetro se atribuye a Galileo, aunque el termómetro sellado no apareció hasta 1650. Los modernos termómetros de alcohol y mercurio fueron inventados por el físico alemán Gabriel Fahrenheit, quien también propuso la primera escala de temperaturas ampliamente adoptada, que lleva su nombre. En la escala Fahrenheit, el punto de congelación del agua corresponde a 32 grados (32 F) y su punto de ebullición a presión normal es de 212 F. Desde entonces se han propuesto diferentes escalas de temperatura; en la escala centígrada, o Celsius, diseñada por el astrónomo sueco Anders Celsius y utilizada en la mayoría de los países, el punto de congelación es 0 grados (0°C) y el punto de ebullición es de 100°C.

#### 1.2.2.2 Termistor

La resistencia eléctrica de un conductor o un semiconductor varía cuando se cambia su temperatura. En este fenómeno se basa el termómetro de resistencia (termistor), en el que se aplica una tensión eléctrica constante al termistor, o elemento sensor. Para un termistor dado, a cada temperatura corresponde una resistencia eléctrica diferente. La resistencia puede medirse mediante un galvanómetro, lo que permite hallar la temperatura.

Los termistores son de dos tipos: resistencias Negative Temperature Coefficient NTC o de coeficiente negativo de temperatura y resistencias Positive Temperature Coefficient PTC o de coeficiente positivo.

Los primeros se comportan bajando su valor óhmico ante una subida de temperatura y los segundos a la inversa, es decir, su valor sube cuando aumenta la temperatura, se emplean para estabilizar térmicamente algunas partes de circuitos y como sensores en equipos reguladores de temperatura.

Para medir temperaturas entre  $-50$  y  $150^{\circ}\text{C}$  se utilizan diferentes termistores fabricados con óxidos de níquel, manganeso o cobalto. Para temperaturas más altas se emplean termistores fabricados con otros metales o aleaciones; por ejemplo, el platino puede emplearse hasta los  $900^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. Usando circuitos electrónicos adecuados, la lectura del galvanómetro puede convertirse directamente en una indicación de la temperatura.

### 1.2.2.3 Termopares

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría), se mantienen a distinta temperatura Figura 1.1. Esta circulación es debida a dos efectos termoeléctricos combinados, uno es el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión. El otro efecto es el de Thomson, que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura.

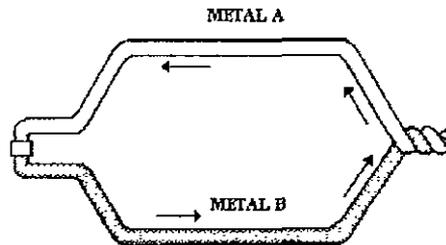


Figura 1.1 Termopar

El efecto Peltier Figura 1.2 consta de una cruz térmica formada por la unión en su centro de dos metales distintos, sobre de esta se hace pasar una corriente en uno u otro sentido con el interruptor  $k_2$  abierto. Después de cada paso de corriente se abre  $k_1$  (desconectándose la

pila) y se cierra  $k_2$  leyendo en el galvanómetro G, la f.e.m.- (fuerza electromotriz) creada, la cual es proporcional a la temperatura alcanzada por la cruz térmica en cada caso.

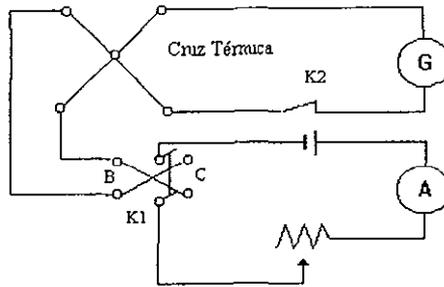


Figura 1.2 Efecto Peltier

El efecto Thomson puede detectarse en el circuito Figura 1.3, formado por una barra metálica MN, con un termopar diferencial AB aislado y una bobina H para calentamiento eléctrico, centrada con relación al termopar diferencial. Al calentar con la bobina uno de los puntos el B por ejemplo, se presentará una diferencia de temperaturas con el punto A, esto se podrá observar en el galvanómetro; si se hace pasar una corriente por la barra MN, se notará un aumento o disminución de la temperatura diferencial con el efecto contrario si se invierte la corriente.

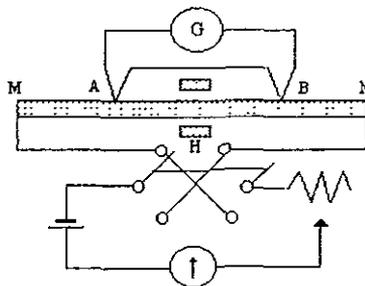


Figura 1.3 Efecto Thomson

La combinación de estos dos efectos es la causa de la circulación de la corriente al cerrar el circuito en el termopar.

La aplicación de los termopares está sujeta a una serie de limitaciones, por lo que conviene tomarlas en consideración para su uso adecuado. La temperatura máxima que alcanza un termopar debe ser inferior a su temperatura de fusión. Por lo que hay que elegir un modelo adecuado a los valores de temperatura a medir. También debe garantizarse que el medio donde se va a medir no ataque a ninguno de los metales de la unión. La corriente que circule por el circuito de termopares debe ser mínima, de no ser así la temperatura de los conductores, y en particular de las uniones, será distinta a la del entorno, debido al flujo de calor desde y hacia el circuito.

La protección del termopar frente al ambiente se logra mediante una vaina o tubo de protección, normalmente de acero inoxidable, acero sin soldadura, iniconel, cerámica, carburo de silicio, etc. Para hornos o secadores se utiliza la vaina de cerámica o pirómetro de radiación.

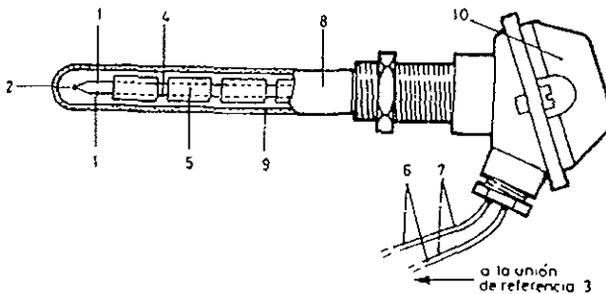


Figura 1. 4 Termopar industrial con vaina

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. Conductores (diferentes)     | 6. Cables de extensión iguales a los del termopar       |
| 2. Unión de medida              | 7. Cables de compensación, diferentes de los termopares |
| 3. Unión de referencia          | 8. Caña pirométrica                                     |
| 4. Hilos de termopar sin aislar | 9. Protector (cubierta externa)                         |
| 5. Hilos de termopar aislados   | 10. Cabeza de la caña                                   |

Los termopares tienen muchas ventajas y son los sensores más frecuentes para la medida de temperaturas. Tienen un alcance de medida grande, que va desde  $-270^{\circ}\text{C}$  hasta

3,000 °C, su estabilidad a largo plazo es aceptable y su fiabilidad elevada. Para temperaturas bajas tienen muy buena exactitud; son de tamaños pequeños permitiendo con esto tener velocidades de respuesta rápidas, del orden de milisegundos, y se dispone de modelos de bajo precio

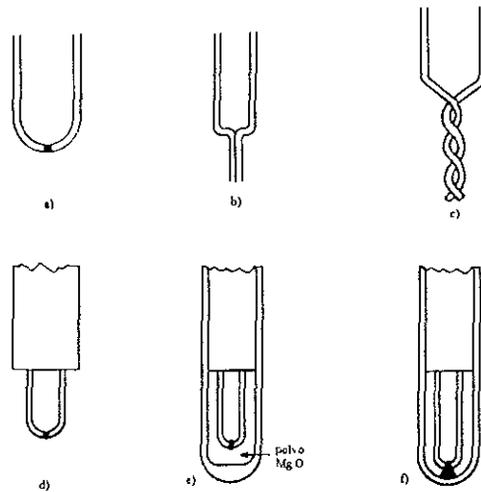
A continuación se presenta la tabla 1.1 de tensiones contra temperatura para un termopar tipo J entre 0 y 110 °C.

Grados °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.865	0.916	0.967	1.019
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	1.536
30	1.536	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006	2.058
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	2.585
50	2.585	2.638	2.691	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062	3.115
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595	3.649
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132	4.186
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.563	4.617	4.671	4.725
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213	5.268
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.703	5.758	5.812

Tabla 1.1 Tensiones contra temperatura para un termopar tipo J. Las tensiones están dadas en milivoltios.<sup>1</sup>

Según la aplicación, se dispone de distintos tipos de uniones. Las uniones desnudas se emplean para medidas estáticas, pero son frágiles, o de flujos de gases no corrosivos donde se requiere de un tiempo de respuesta rápido figura 1.5.

<sup>1</sup> Ramón Pallas Areny Sensores y Acondicionadores de Señal. 2ª Edición España, pag. 279



**Figura 1. 5** Distintos tipos de uniones de termopares y sus vainas.

- a) unión soldada en extremos
- b) unión soldada en paralelo
- c) hilo trenzado
- d) termopar expuesto: respuesta rápida
- e) termopar encapsulado: aislamiento eléctrico y ambiental
- f) termopar unido a la cubierta: aislamiento ambiental

A continuación se presentan algunos tipos de uniones de termopares:

- ☞ Uniones soldadas en extremo: están fabricadas mediante dos hilos planos con sus extremos juntos y uniendo estos extremos mediante una soldadura de resistencia.
- ☞ Uniones en perla: se forman calentando los extremos de los hilos unidos a sus puntos de fusión, y girando la soldadura hasta que se forma una perla en el extremo.
- ☞ Uniones de empalme soldado: los extremos del hilo están soldados de manera que estén en contacto con otro a través de una longitud de alrededor de 3mm, y soldados mediante resistencia.

- ⇒ Uniones de hilo cruzado: se fabrican doblando los dos extremos del hilo en un ángulo de menos de  $90^{\circ}$ , y colocando un hilo sobre el otro, soldando ambos en su punto de cruce y cortando el exceso de material de hilo del extremo.
  
- ⇒ En las uniones de hilo bobinado un hilo se mantiene recto y el otro se bobina ajustadamente sobre el hilo recto. Este tipo, así como el de uniones de hilo trenzado, usualmente están soldados usando gas o arco eléctrico, pero también pueden estar bronceados o soldados mediante plata.

Las uniones de termopares pueden estar conectadas a tierra o aisladas, expuestas a la intemperie o encapsuladas. Las constantes de tiempo más cortas (los tiempos de respuesta más rápidos) se obtienen con las uniones expuestas del extremo soldado (para un diámetro de hilo dado). En muchas aplicaciones, la unión debe protegerse del fluido a medir. En este caso se utilizan uniones encapsuladas (protegidas), pudiendo estar conectadas a tierra o no. Las uniones encapsuladas no conectadas a tierra tienen la constante de tiempo más grande. Las uniones encapsuladas y conectadas a tierra se utilizan cuando esta puesta a tierra es compatible con el circuito asociado, cuando la captura de ruido en el hilo por la unión no es un problema significativo, y cuando el error de conducción (errores debidos a la conducción térmica a través del extremo del sensor) puede ser minimizado o es aceptable. Las uniones conectadas a tierra pueden fabricarse uniendo y soldando los extremos de los hilos juntos en el interior del extremo de la vaina (sonda), o soldando los dos extremos del hilo separadamente con el extremo de la sonda, estando muy próximo un hilo del otro. Las uniones termopar son conectadas a tierra cuando están soldadas a la superficie a medir, que se conecta al potencial de tierra del sistema.

La selección de un sensor de temperatura implica a una extensa matriz de consideraciones que es necesario evaluar en la selección del tipo de sensor. Principalmente es necesario seleccionar un diseño cuyo elemento sensor alcance la temperatura del fluido o superficie a medir, y la alcance dentro de un tiempo permisible para realizar la medición.

Especial cuidado debe tenerse en el diseño de las jaulas cuya finalidad es el aislamiento del elemento del calor radiado o cuando se consideran temperaturas estáticas. Para los termopares de unión expuesta, se recomienda la utilización de termopares del tipo J para los fluidos reductores; tipos K, E, R, y S para fluidos oxidantes y tipo T para fluidos reductores y oxidantes o atmosféricas.

La selección de uniones de termopares conectados a tierra o no conectados a tierra, viene dada principalmente por el compromiso entre la constante de tiempo rápida de una unión conectada a tierra contra el aumento de potencial de ruido eléctrico asociado; muchos sistemas de datos requieren puesta a tierra en punto único, lo que provoca el uso de uniones sin conexión a tierra.

Es posible efectuar mediciones de temperatura muy precisas empleando termopares, en los que se genera una pequeña tensión (del orden de milivoltios) al colocar a temperaturas distintas las uniones de un bucle formado por dos alambres de distintos metales. Para incrementar la tensión pueden conectarse en serie varios termopares para formar una termopila. Como la tensión depende de la diferencia de temperaturas en ambas uniones, una de ellas debe mantenerse a una temperatura conocida; en caso contrario hay que introducir en el dispositivo un circuito electrónico de compensación para hallar la temperatura del sensor.

Los termistores y termopares tienen a menudo elementos sensores de sólo uno o dos centímetros de longitud, lo que les permite responder con rapidez a los cambios de la temperatura y los hace ideales para muchas aplicaciones en biología e ingeniería.

#### 1.2.2.4 Termostato

Dispositivo que regula automáticamente la temperatura de un sistema, manteniéndola constante o variándola dentro de un rango específico. Los termostatos se usan mucho en hornos industriales, sistemas de calefacción y en otras aplicaciones de ingeniería en las que un

proceso debe tener lugar a temperaturas controladas. Los termostatos también se usan para controlar la refrigeración del agua que pasa por el radiador de los motores enfriados por agua.

La mayoría de los termostatos dependen de la expansión de una sustancia determinada como consecuencia de un incremento de la temperatura. Por ejemplo, los termostatos de agua tienen varias cápsulas en forma de disco, que se llenan ya sea totalmente con gas o parcialmente con un líquido que hierve a una temperatura dentro de un rango deseado. Cuando se calienta, la presión interna aumenta, las cápsulas flexibles se expanden y se produce un movimiento mecánico que activa las válvulas de control o los relés (relevadores) de los sistemas de calefacción o de aire acondicionado. Una disminución de la temperatura produce la contracción y el movimiento opuesto.

Otros termostatos muy utilizados dependen del alargamiento diferencial que se produce cuando se calientan dos tiras unidas, una sobre otra, de metales diferentes. Si uno de los extremos de esta tira doble está fijo, y el otro está libre, un aumento de temperatura alarga un metal más que el otro, provocando que la tira se curve. Este movimiento se usa para accionar un contacto eléctrico o un relé.

Los pequeños movimientos y las fuerzas limitadas que se generan con muchos dispositivos termostáticos pueden requerir algún tipo de amplificación mecánica, mediante un sistema de fuelles, o bien una amplificación eléctrica a través de interruptores de relé que actúan sobre los controles del sistema. De este modo, el elemento bimetálico del termostato utilizado en calefacciones domésticas, que funciona como un resorte de reloj, puede diseñarse de forma que actúe sobre un contacto de mercurio que permite pasar la corriente necesaria para que funcione la caldera.

También pueden usarse otros dispositivos termostáticos, como los termopares y los termómetros de resistencia, como detectores de temperatura en termostatos si la variación de la señal eléctrica se amplifica para hacer funcionar los controles.

### 1.2.2.5 Pirómetro óptico

El pirómetro óptico se emplea para medir temperaturas de objetos sólidos que superan los 700 °C, cuando la mayoría de los restantes termómetros se fundiría. A esas temperaturas los objetos sólidos irradian suficiente energía en la zona visible para permitir la medición óptica a partir del llamado fenómeno del color de incandescencia. El color con el que brilla un objeto caliente varía con la temperatura desde el rojo oscuro al amarillo y llega casi al blanco a unos 1.300 °C. El pirómetro contiene un filamento similar a un foco o bombilla. El filamento está controlado por un reóstato calibrado de forma que los colores con los que brilla corresponden a temperaturas determinadas. La temperatura de un objeto incandescente puede medirse observando el objeto a través del pirómetro y ajustando el reóstato hasta que el filamento presente el mismo color que la imagen del objeto y se confunda con ésta. En ese momento, la temperatura del filamento (que puede leerse en el reóstato calibrado) es igual a la del objeto.

### 1.2.2.6 Termómetros especiales

Los termómetros también pueden diseñarse para registrar las temperaturas máximas o mínimas alcanzadas. Por ejemplo, un termómetro clínico de mercurio es un instrumento de medida máxima, en el que un dispositivo entre la ampolla y el capilar de vidrio permite que el mercurio se expanda al subir la temperatura pero impide que regrese a no ser que se agite con fuerza. Las temperaturas máximas alcanzadas durante el funcionamiento de herramientas y máquinas también pueden estimarse mediante pinturas especiales que cambian de color cuando se alcanza una temperatura determinada.

### 1.2.2.7 Transductores electrónicos

Además de los sensores de temperatura antes descritos que aprovechan una de sus características físicas, como alargamiento, color, etc., existen los sensores construidos como Circuitos Integrados C.I., es decir basado en transistores, los cuales a partir de la temperatura que los rodea generan un voltaje de salida proporcional a esa temperatura. La Tabla 1.2

muestra los distintos tipos de sensores encontrados. De los cuales decidimos utilizar para el modelo a escala el LM35A, debido a que su salida es directamente proporcional con la temperatura en °C, por su rango de temperatura que es de - 55 °C a 150 °C, que cubre perfectamente el rango que utilizaremos (0°C a 100 °C) y por su precisión de  $\pm 1$  °C que es la menor encontrada para este tipo de dispositivos, además de ser de bajo costo.

### **Descripción general del LM35A**

La serie LM35 son C.I. sensores de temperatura, su voltaje de salida es linealmente proporcional con la temperatura en grados centígrados. El LM35 tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura calibrados en Kelvin y es que el usuario no requiere un voltaje constante a restar, para obtener la salida en °C.

El LM35 tiene una baja impedancia de salida, salida lineal y su inherente calibración precisa, hacen que su interface de lectura o circuito de control sea especialmente fácil. Se puede usar con fuentes de poder sencillas o con fuentes positivas y negativas. Como requieren únicamente 60  $\mu$ A, de la fuente, esto hace que su calentamiento propio sea bajo.

Parte	Rango de Temperatura	Tolerancia	Escala de salida
LM34A	-50 °F a + 300 °F	± 2.0 °F	10mV/°F
LM34	-50 °F a + 300 °F	± 3.0 °F	10mV/°F
LM34CA	-40 °F a + 230 °F	± 2.0 °F	10mV/°F
LM34C	-40 °F a + 230 °F	± 3.0 °F	10mV/°F
LM34D	+32 °F a + 212 °F	± 4.0 °F	10mV/°F
LM35A	-55 °C a + 150 °C	± 1.0 °C	10mV/°C
LM35	-55 °C a + 150 °C	± 1.5 °C	10mV/°C
LM35CA	-40 °C a + 110 °C	± 1.0 °C	10mV/°C
LM35C	-40 °C a + 110 °C	± 1.5 °C	10mV/°C
LM35D	0 °C a + 100 °C	± 2.0 °C	10mV/°C
LM45B	-20 °C a + 100 °C	± 2.0 °C	10 mV/°C
LM45C	-20 °C a + 100 °C	± 3.0 °C	10 mV/°C
LM134-3	-55 °C a + 125 °C	± 3.0 °C	$I_{set} \propto K$
LM134-6	-55 °C a + 125 °C	± 6.0 °C	$I_{set} \propto K$
LM234-3	-25 °C a + 100 °C	± 3.0 °C	$I_{set} \propto K$
LM234-6	-25 °C a + 100 °C	± 6.0 °C	$I_{set} \propto K$
LM334	0 °C a + 70 °C	± 6.0 °C	$I_{set} \propto K$
LM135A	-55 °C a + 150 °C	± 1.3 °C	10mV/°K
LM135	-55 °C a + 150 °C	± 6.0 °C	10mV/°K
LM235A	-40 °C a + 125 °C	± 1.3 °C	10mV/°K
LM235	-40 °C a + 125 °C	± 2.0 °C	10mV/°K
LM335A	-40 °C a + 100 °C	± 2.0 °C	10mV/°K
LM335	-40 °C a + 100 °C	± 4.0 °C	10mV/°K

Tabla 1.2 Características de los sensores de temperatura.

### Características

- ↻ Calibrado directamente en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ↻ Lineal  $+10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  Factor de escala.
- ↻ Precisión de  $0.5^{\circ}\text{C}$  generalizando a temperatura ambiente  $+25^{\circ}\text{C}$ .
- ↻ Rango de temperatura generalizado  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$ .
- ↻ Colocación en aplicaciones remotas.
- ↻ Bajo costo.
- ↻ Opera desde 4 hasta 30 volts.
- ↻ Corriente de drenaje menor que  $60\text{ }\mu\text{A}$ .
- ↻ No lineal únicamente  $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$  típico.
- ↻ Baja impedancia de salida,  $0.1\ \Omega$  para una carga de  $1\text{ mA}$ .

### Aplicaciones

El LM35 puede ser usado fácilmente en la misma forma que otros circuitos integrados sensores de temperatura. Puede ser pegado o cementado a una superficie y esta deberá tener aproximadamente  $0.01^{\circ}\text{C}$  de diferencia respecto a la temperatura a sensar. Esto asegura que la temperatura ambiente es la misma que la temperatura de la superficie; si la temperatura del ambiente es mayor o menor que la temperatura de la superficie, el sensor entregará un valor entre las dos.

### 1.2.3 Precisión de las medidas

La medida precisa de la temperatura depende del establecimiento de un equilibrio térmico entre el dispositivo termométrico y el entorno; en el equilibrio, no se intercambia calor entre el termómetro y el material adyacente o próximo. Por eso, para que la medida de un termómetro clínico sea precisa debe colocarse durante un periodo de tiempo suficiente (más de un minuto) para que alcance un equilibrio casi completo con el cuerpo humano. Estas condiciones son casi imposibles de lograr con un termómetro oral, que suele indicar una temperatura corporal menor que la proporcionada por un termómetro rectal. Los tiempos de inserción se reducen de forma significativa con termómetros pequeños de reacción rápida, como los que emplean termistores.

Un termómetro sólo indica su propia temperatura, que puede no ser igual a la del objeto cuya temperatura queremos medir. Por ejemplo, si medimos la temperatura en el exterior de un edificio con dos termómetros situados a pocos centímetros, uno de ellos a la sombra y otro al sol, las lecturas de ambos instrumentos pueden ser muy distintas, aunque la temperatura del aire es la misma. El termómetro situado a la sombra puede ceder calor por radiación a las paredes frías del edificio. Por eso, su lectura estará algo por debajo de la temperatura real del aire. Por otra parte, el termómetro situado al sol absorbe el calor radiante del sol, por lo que la temperatura indicada puede estar bastante por encima de la temperatura real del aire. Para evitar esos errores, una medida precisa de la temperatura exige proteger el termómetro de fuentes frías o calientes a las que el instrumento pueda transferir calor (o que puedan transferir calor al termómetro) mediante radiación, conducción o convección.

## Conclusión

En este primer capítulo tratamos conceptos de medición y los distintos transductores que se encuentran actualmente en el mercado.

Definimos el concepto de precisión y exactitud, que aunque para varias personas resulten términos semejantes, en el campo de la medición tienen un significado distinto, ya que el primero de ellos se refiere a la capacidad de repetibilidad de una medición, mientras que la exactitud es la diferencia entre el valor medido y su valor real. Posteriormente definimos resolución y sensibilidad, la resolución se refiere al dígito menos significativo que podemos leer, y la sensibilidad puede ser distinta dependiendo del tipo de sensor empleado, de preferencia se desean sensores con respuesta lineal.

Por otro lado se describieron los distintos transductores utilizados para medir temperatura como son termómetro, termopares, termostato, pirómetro óptico, termómetros especiales y transductores electrónicos.

Por sus características que se mencionaron y debido a que las pruebas que se piensan realizar están en un rango de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, nos hemos decidido por un termopar tipo J de Hierro-Constantán, el cual maneja temperaturas desde  $0^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$ . Los termopares J son versátiles, lineales y de bajo costo, se pueden emplear en hornos de combustión abiertos a la atmósfera.

Para el desarrollo del prototipo empleado para las pruebas, decidimos utilizar el circuito integrado (LM35) que por sus características de medición lineal y su bajo costo resulta ideal para estas pruebas.

## Capítulo 2

# Teoría de control y temperatura

---

En este capítulo revisaremos de los diferentes puntos a considerar en el problema del control, definiciones y formas en las cuales se lleva a cabo, se presentan los diversos métodos de generación de las señales de control como la derivada o integral de la señal de error. Se analizan los efectos de los distintos modos de control en el funcionamiento de sistema. Los procedimientos para reducción de los efectos de las perturbaciones externas, también se verá el concepto de temperatura, la forma en que se manifiesta a través del calor y la forma en que se lleva a cabo esa transferencia.

### 2.1 Control

Marco histórico.

Algunos principios de control automático ya eran utilizados en el siglo tercero antes de Cristo; Tesibio, inventor griego, diseñó en esa época una clepsidra que utilizaba un mecanismo similar al usado en los carburadores de automóviles actuales. El termostato y algunos aparatos para que los molinos mantuvieran las aspas contra el viento, aun cuando éste cambiara de dirección, fueron inventados en los siglos XVII y XVIII respectivamente.

Sin embargo, los sistemas de control automático comenzaron su desarrollo intenso durante la revolución industrial. En esa época James Watt adaptó el primer regulador automático de velocidad a la máquina de vapor. A mediados del siglo XIX, James C. Maxwell analizó por primera vez diversos tipos de gobernadores de velocidad, y relacionó el problema de la estabilidad de los mismos con un modelo algebraico, el cual fue resuelto posteriormente

por Hurwitz. Alrededor de 1930, Nyquist y Bode desarrollaron técnicas de análisis para sistemas retroalimentados utilizando conceptos de respuesta en frecuencia.

Durante la segunda guerra mundial, el interés en las aplicaciones bélicas, hizo que se consideraran problemas de dirección y guía de proyectiles balísticos, lo que tuvo como consecuencia el estudio de sistemas estocásticos y no lineales. Desde los últimos años de la década de 1950, gracias al advenimiento de las computadoras digitales, se han utilizado nuevamente las variables de estado y se han estudiado más a fondo problemas tales como optimización y control bajo incertidumbre; también se ha desarrollado en los últimos veinte años el control numérico y el control jerarquizado. Recientemente se ha notado un cambio en el campo de aplicación de la teoría de control y los ingenieros de esta rama ayudan a analizar, problemas ecológicos, sociales y económicos.

### **2.1.1 El concepto de control**

Dar definiciones generales sobre una disciplina es una tarea difícil y arriesgada. Difícil, porque se trata de resumir el contenido de varias líneas en unas cuantas, y arriesgada, porque siempre cabe la posibilidad de dejar fuera de la definición algunos aspectos importantes.

De una manera informal, el control consiste en seleccionar, de un conjunto específico o arbitrario de elementos, aquellos que, aplicados a un sistema fijo, hagan que este se comporte de la manera deseada.

Consta de tres elementos:

- a) uno que se puede modificar, llamado entrada,
- b) otro, llamado salida, que se desea, tenga ciertas características,
- c) un tercero, llamado planta que relaciona la entrada con la salida y que no puede ser modificado.



Figura 2.1 Diagrama básico de control.

El control consiste en elegir, para un sistema dado; una entrada que haga responder a la planta de una manera deseada; esto es, que se obtenga una salida con cierta característica.

El problema del control lo podemos dividir en las siguientes partes:

- a) *Modelado* Para poder hacer un análisis es necesario tener una representación de la planta; esto se logra mediante un modelo. La selección del modelo depende fundamentalmente de los usos que se le darán y el costo de su elaboración.
- b) *Simplificación* Un modelo muy preciso de la planta suele resultar demasiado complejo. Entonces conviene indagar cuales son las suposiciones simplificadoras posibles y su influencia sobre la verosimilitud del modelo.
- c) *Simulación* Una vez elaborado el modelo, es posible verificar su validez por medios analíticos o de simulación. Este último suele usarse también para familiarizarse con el comportamiento del sistema.
- d) *Estabilidad* Uno de los aspectos de mayor importancia sobre el comportamiento de un sistema es el referente a su estabilidad. Un sistema es estable si al aplicarle una entrada pequeña los efectos que produce son pequeños. Para determinar si un sistema es estable o no, pueden utilizarse métodos de simulación o estudios analíticos.
- e) *Estimación*. Muchas veces es necesario indagar el valor de ciertas variables internas del sistema a partir del conocimiento de la entrada y la salida, porque algunas decisiones para controlarlo deben tomarse en función del valor de esas variables.
- f) *Regulación*. Es el problema de control que consiste en mantener a la planta en un estado prefijado.

g) *Optimización* Cuando el objetivo de un problema de control es minimizar o maximizar alguna cantidad, se tiene un problema de optimización.

### 2.1.2 Realimentación

Dado un sistema con sus tres elementos: entrada, planta y salida, el problema de control consiste en seleccionar una entrada para que la salida tenga ciertas características. En particular, cuando la entrada y la salida son funciones del tiempo, puede resolverse el problema de dos maneras diferentes. Una, llamada de “malla abierta”, consiste en seleccionar la entrada en función del tiempo, con lo cual se obtendrá la salida deseada. Esta entrada se aplica al sistema de entrada programada.

La otra forma, llamada de “malla cerrada” o de realimentación (retroalimentación), es modificando la entrada en función de la salida que se vaya produciendo. En este último enfoque se utiliza el concepto de realimentación por medio del cual se toman los valores de la salida para modificar la entrada.

La diferencia entre el control de malla abierta y el de malla cerrada depende de qué parte del sistema se considera planta, es decir si este incluye o no la parte de realimentación, como se muestra en la Figura 2.2.

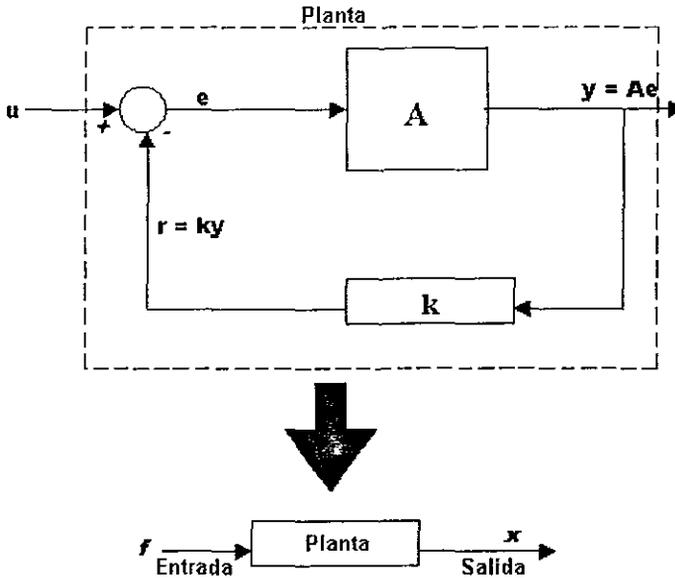


Figura 2.2 Control de malla cerrada vista como malla abierta.

Las ecuaciones que describen al sistema son:

$$e = u - r$$

$$r = ky$$

$$y = Ae$$

y eliminando  $r$  y  $e$  de las ecuaciones anteriores se obtiene

$$y = A(u - ky)$$

$$y = \frac{A}{1 + kA} u$$

Si se escoge  $k$  de tal modo que  $kA$  (la ganancia de malla) sea mucho mayor que la unidad, la relación entre la entrada y la salida puede aproximarse por

$$y = \frac{Au}{1 + kA} \approx \frac{A}{kA} u = \frac{u}{k}$$

Se concluye que la salida del sistema realimentado es menos sensible a la variación de la ganancia que el amplificador original y los efectos transitorios del sistema son más rápidos. Sin embargo, en algunos casos, el aumento excesivo de la realimentación puede producir una degradación del comportamiento del sistema, al presentarse efectos no deseables como las oscilaciones.

### 2.1.2.1 Definición de sistema y concepto de estado.

**Sistema.** Es un conjunto de elementos (entrada – salida) trabajando en conjunto para lograr un fin común.

Sí la entrada se representa como  $u$  y la salida como  $y$ , el tipo de sistemas que estudiaremos podría denotarse matemáticamente por la relación:

$$y = S[u]$$

Gráficamente corresponde a la Figura 2.3.

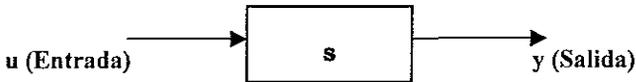


Figura 2.3 Definición de sistema

Sí, además, se hace la suposición de *unicidad* (o determinismo), esto es, que a cada entrada le corresponde una y sólo una salida, entonces la relación es una función.

Existen dos tipos de sistemas:

- a) Sistemas causales.

Un sistema es causal o no anticipatorio, sí la salida en un instante no depende del valor de la entrada en instantes posteriores.

Formalmente un sistema es causal si para dos entradas cualesquiera  $u'[t_c, t_\infty)$  y  $u''[t_c, t_\infty)$ , para todos los valores de  $t$  en que se cumple la igualdad

$$u'[t_c, t_\infty) = u''[t_c, t_\infty)$$

las salidas correspondientes

$$y'[t_c, t_\infty) = S\{u'[t_c, t_\infty)\}$$

$$y''[t_c, t_\infty) = S\{u''[t_c, t_\infty)\}$$

satisfacen

$$y'[t_c, t_\infty) = y''[t_c, t_\infty)$$

#### b) Sistemas no causales

Un sistema es no causal o anticipatorio, si la salida en un instante depende del valor de la entrada en instantes posteriores.

Formalmente un sistema es no causal si para dos entradas cualesquiera  $u'[t_c, t_\infty)$  y  $u''[t_c, t_\infty)$ , para todos los valores de  $t$  en que se cumple la igualdad

$$u'[t_c, t_\infty) = u''[t_c, t_\infty)$$

las salidas correspondientes

$$y'[t_c, t_\infty) = S\{u'[t_c, t_\infty)\}$$

$$y''[t_c, t_\infty) = S\{u''[t_c, t_\infty)\}$$

no satisfacen

$$y'[t_c, t_\infty) = y''[t_c, t_\infty)$$

La Figura 2.4 ilustra un sistema que no es causal, ya que aún cuando las entradas  $u_1$  y  $u_2$  coinciden en el intervalo  $[t_c, t_1]$ , resulta que  $y_1 \neq y_2$  en el mismo.

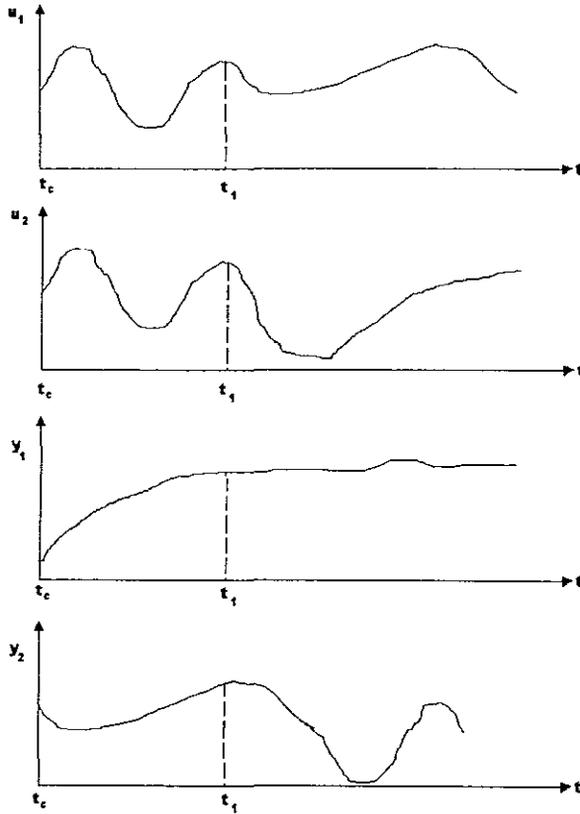


Figura 2.4 Sistemas no causales.

## 2.2 Clasificación de los sistemas dinámicos.

Los sistemas dinámicos, o sea, aquellos que son causales y determinísticos, pueden clasificarse de acuerdo con varios criterios: número de estados, linealidad de la relación entrada-salida, invariaciones con el tiempo de la relación entrada-salida, etcétera.

La clasificación se hará de acuerdo con el número de estados diferentes en que se puede encontrar el sistema, o sea conforme al número de clases de equivalencia de segmentos de entradas; así es factible distinguir los siguientes tipos de sistemas:

- a) Si sólo hay una clase de equivalencia, o sea que todos los segmentos de entrada son equivalentes, el sistema es *algebraico*.
- b) Si el número de clases de equivalencias es *finito*, se dice que el sistema es *autómata finito*.
- c) Si el número de clases de equivalencia es infinito pero numerable (esto es, que existe una correspondencia uno a uno entre las clases de equivalencia y los números naturales) el sistema es *autómata infinito*.
- d) Si existe un número infinito no numerable de clases de equivalencia, pero se puede establecer una correspondencia biunívoca se dice que el sistema es de *parámetros concentrados*.
- e) Si existe un número infinito no numerable y además no es posible establecer una correspondencia biunívoca entre los números reales y las clases de equivalencia, el sistema es de *parámetros distribuidos*.

### 2.2.1 Linealidad

Se dice que la representación de un sistema dinámico es lineal si para cualquier  $t_0 > t$ , todas las entradas  $u_1$  y  $u_2$  definidas en  $[t_0, t]$ , todos los estados  $x_1(t_0)$ ,  $x_2(t_0)$  y cualquier número  $k$  se cumple que:

$$k F\{x_1(t_0), u_1[t_0, t]\} + k F\{x_2(t_0), u_2[t_0, t]\} = F\{k [x_1(t_0) + x_2(t_0)], k(u_1 + u_2)[t_0, t]\}$$

Se pueden deducir algunas propiedades interesantes a partir de la definición anterior que ayudarán a comprender mejor el concepto de representación lineal de un sistema.

Una primera propiedad dice que la respuesta de un sistema lineal es la suma de dos partes: una debida al estado inicial  $x(t_0)$  y la otra a la entrada  $u$ . Para deducir esta propiedad basta hacer en la ecuación de la definición  $k = 1, u_2 = 0$ ,  $u_1 = u$ , y  $x_1(t_0) = x(t_0)$ , con lo que resulta.

$$F[x(t_0), u [t_0, t]] = F[x(t_0), 0] + F[0, u [t_0, t]]$$

Los dos términos de la derecha de esta ecuación corresponden, respectivamente, a la *solución homogénea* y a la *solución particular* encontradas al resolver ecuaciones diferenciales lineales.

Una segunda propiedad que se puede deducir de la definición de linealidad es que

$$F[0, u_1 + u_2] = F[0, u_1] + F[0, u_2]$$

y

$$F[x_1(t_0) + x_2(t_0), 0] = F[x_1(t_0), 0] + F[x_2(t_0), 0]$$

Estas indican que la salida debida a la suma de dos entradas, cuando el estado inicial es cero, es igual a la suma de las salidas debidas a cada una de las entradas y, además, que la salida que se obtiene con la suma de dos estados iniciales y entrada nula es igual a la suma de las salidas debidas a cada estado inicial por separado. Esta propiedad se llama *superposición o aditividad*. Por último, a partir de la definición fundamental, se obtienen las siguientes propiedades:

$$F[0, k u_1] = k F[0, u_1]$$

y

---

$$F[kx(t_0), 0] = k F[x(t_0), 0]$$

que equivale a afirmar que si el estado inicial es cero, entonces al multiplicar la entrada por un escalar  $k$  se obtiene  $k$  veces la salida debida a la entrada original y de igual forma, si el estado inicial se escala por un factor  $k$  con entrada cero, la salida se escala proporcionalmente. Esta propiedad se llama *homogeneidad*. Entonces la representación de un sistema dinámico es homogénea y aditiva, si y sólo si la representación es lineal

### 2.2.2 Invarianza con el tiempo.

Algunos sistemas tienen la característica de que los análisis que se efectúan en un tiempo determinado son válidos para cualquier otro tiempo, es decir, sus propiedades son invariables con traslaciones en el tiempo.

Para introducir formalmente el concepto de invariancia conviene dar la definición de retraso.

Un sistema  $Rt$  (retraso) es aquel en el cual la relación entrada-salida es

$$y(t) = u(t - T) = Rt [u(t)]$$

Esto es, la salida retrasada es idéntica a la que se obtiene con la entrada retrasada.

## 2.3 Acciones básicas de control

En este tema se presentan los diversos métodos de generación de las señales de control como la derivada o integral de la señal de error. Se analizan los efectos de los distintos modos de control en el funcionamiento de sistema. Los procedimientos para reducción de los efectos de las perturbaciones externas son los que a continuación se tratan.

### 2.3.1 Clasificación de los controles automáticos

Se pueden clasificar los controles automáticos de acuerdo con su acción de control en,

- 1 - Control on / off (o de dos posiciones).
- 2.- Control proporcional.
- 3 - Control integral.
- 4.- Control proporcional integral.
- 5.- Control proporcional derivativo.
- 6.- Control proporcional integral derivativo.

### 2.3.1.1. Control on/off (o de dos posiciones)

El elemento accionador tiene dos posiciones fijas Este control es relativamente simple y económico, por lo que es altamente utilizado.

En la Figura 2.5 se presentan los diagramas de bloques de control on/off

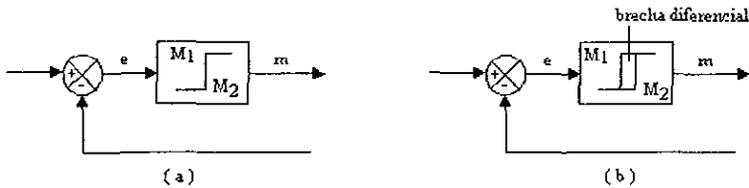


Figura 2.5 (a) Diagrama de bloques de un control on/off; (b) diagrama de bloque de un control on/off con brecha diferencial.

Sea la señal de salida de control  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$ . En este tipo de control, la señal  $m(t)$  permanece en un valor máximo o mínimo, según la señal de error actuante sea positiva o negativa, de modo que

$$\begin{aligned}
 m(t) &= M_1 && \text{para } e(t) > 0 \\
 m(t) &= M_2 && \text{para } e(t) < 0
 \end{aligned}$$

donde  $M_1$  y  $M_2$  son constantes. El valor de  $M_2$  es cero o bien menos  $M_1$ .

El rango en el que se debe desplazar la señal de error actuante antes de que se produzca la conmutación se llama brecha diferencial; esta brecha diferencial hace que la salida de control  $m(t)$  mantenga su valor hasta que la señal de error actuante haya pasado levemente del valor cero.

### Materialización

Su construcción se lleva a cabo por medio de interruptores Figura 2.6 manuales o controlados como pueden ser relevadores o contactores termomagnéticos, para controlar la temperatura como en el caso de esta tesis se pueden utilizar termostatos, la desventaja que este tipo de control presenta es que es un control on/off inexacto.

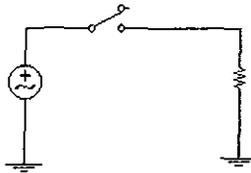


Figura 2.6 Construcción de un control on/off.

### 2.3.1.2. Control proporcional (P).

Para un control P, la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$  es:

$$m(t) = K_p e(t)$$

la función de transferencia es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p$$

donde  $K_p$  se denomina sensibilidad proporcional o ganancia.

El control proporcional esencialmente es un *amplificador con ganancia ajustable*. El diagrama a bloques de este control P es el siguiente

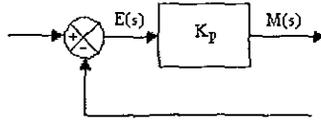


Figura 2.7 Diagrama de bloques de un control proporcional

*Materialización mediante elementos pasivos*

Se utiliza un simple divisor de tensión mediante potenciómetro (Figura 2.8).

$$\dot{V}_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dot{V}_1 \Rightarrow \dot{V}_2 = K_p \dot{V}_1 ; K_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$$

Su inconveniente fundamental radica en que la salida está atenuada, pues  $K_p < 1$ . Como  $V_1$  es la señal de error y ésta ya es de por sí pequeña, la  $V_2$  que se obtiene en la salida es excesivamente pequeña. Para evitarlo hay que añadir al sistema una etapa amplificadora que compense dicha atenuación, lo que recarga notablemente el circuito de control.

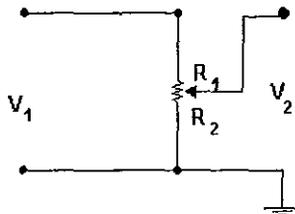


Figura 2.8 Circuito pasivo de control P

*Materialización mediante elementos activos*

Utiliza el conocido montaje de amplificador inversor con amplificador operacional (A.O.), seguido de una etapa inversora de ganancia unitaria en el caso de que no interese la polaridad opuesta entre entrada y salida.

La expresión de la ganancia en el inversor es:

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = -\frac{R_r}{R_e} \quad \bar{V}_2 = -\frac{R_r}{R_e} \bar{V}_1 = K_p \bar{V}_1$$

donde  $K_p$  puede tener el valor que se desee según la relación entre  $R_e$  y  $R_r$ .

En algunas aplicaciones interesa que  $K_p$  sea ajustable, lo que supone ajustar  $R_e$  o  $R_r$ . Como no es aconsejable variar  $R_e$  para no afectar a la impedancia de entrada del circuito, debería ser  $R_r$  la ajustable. Pero  $R_r$  es grande (para  $K_p > 1$ ) pues  $R_e$  lo es ( $Z_e$  elevada), con lo que la sensibilidad del dispositivo será pequeña. Para evitarlo se prefiere ajustar la tensión de realimentación mediante un potenciómetro, de modo que ahora sólo se realimenta una fracción  $\alpha$  de la salida, con la variable entre 0 y 1 como se tendrá en la Figura 2.9.

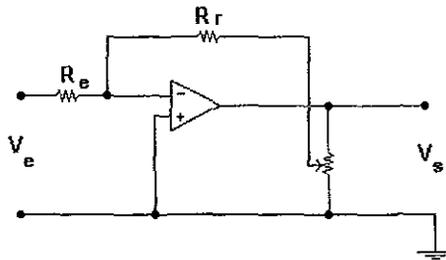


Figura 2.9 Control proporcional con amplificador operacional.

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_r}{\alpha R_e} = \frac{K_p}{\alpha} \quad \begin{cases} \alpha = 1 \Rightarrow K_{\min} = K_p \\ \alpha = 0 \Rightarrow K_{\max} = \infty \end{cases}$$

Con lo que permite ajustar la acción de control a partir de un mínimo fijado por la relación de  $R_i$  con  $R_e$ .

### 2.3.1.3. Control Integral (I)

En un control I, el valor de la salida del controlador  $m(t)$  varía proporcionalmente a la señal de error actuante  $e(t)$ . Esto es:

$$\frac{d m(t)}{d t} = K_i e(t)$$

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

donde  $K_i$  es una constante regulable.

La Figura 2.10 muestra un diagrama de bloques de este control.

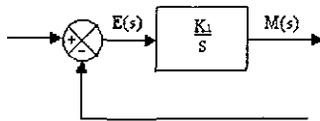


Figura 2.10 Diagrama de bloque de un control integral

La función de transferencia del control integral es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $m(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error actuante igual a cero, el valor de  $m(t)$  se mantiene estacionario. La acción de este control recibe el nombre de control de reposición.

*Materialización mediante elementos pasivos*

Se utiliza una red RC como el de la Figura 2.11.

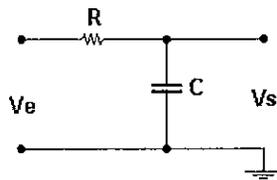


Figura 2.11 Circuito pasivo de control Integral.

Su principal desventaja resulta en que la salida es atenuada, es decir,  $K_i < 1$ .

*Materialización mediante elementos activos*

Se utiliza un circuito integrador como el de la Figura 2.12.

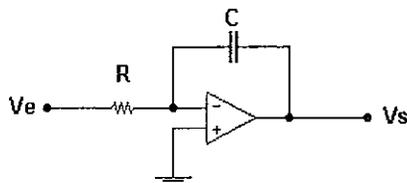


Figura 2.12 Circuito activo de control integral

### 2.3.1.4. Control proporcional e integral (PI)

Este control está definido por la siguiente ecuación

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

La Figura 2.13 muestra un diagrama de bloque de un control PI

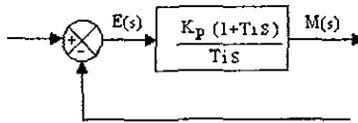


Figura 2.13 Diagrama de bloques de un control proporcional integral.

Donde su función de transferencia es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

donde  $K_p$  representa la sensibilidad proporcional o ganancia y  $T_i$  es el tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  regula la acción de control integral, mientras que al modificar  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control.

La inversa de  $T_i$  es la frecuencia de reposición, esta es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control.

Si la señal de error actuante es una función escalón unitario como en la Figura 2.14 (a), la salida de control  $m(t)$  pasa a ser como se muestra en la Figura 2.14 (b).

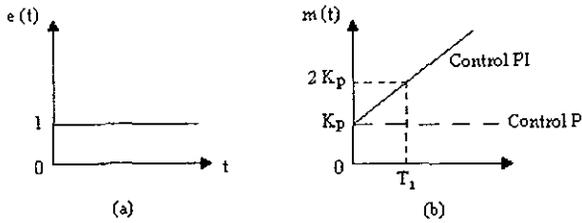


Figura 2.14 (a) y (b) diagramas que muestran una entrada escalón unitario y la salida del control PI

Materialización mediante elementos pasivos

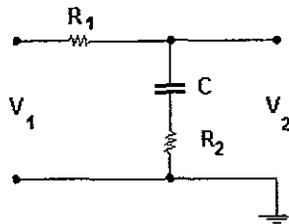


Figura 2.15 Control pasivo de control PI

El circuito es el esquematizado en la Figura 2.15. Su función de transferencia será:

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{R_2 + \frac{1}{Cp}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{Cp}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1 + \frac{1}{C R_2 p}}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{C R_2 p}}$$

Llamando.

$$\left. \begin{array}{l} R_2 = 1 \\ R_1 + R_2 = \beta \\ CR_2 = \tau \end{array} \right\} \frac{V_2}{\bar{V}_1} = \frac{1 + \tau p}{\beta(1 + \beta \tau p)} = \frac{1 + \tau p}{1 + \beta \tau p}$$

Como  $\frac{1}{\beta} = \frac{R_3}{R_1 + R_2} < 1$ , si hacemos  $1/\beta \ll 1$  tendremos que  $\beta \gg 1$  con lo que  $\beta \tau p \gg 1$  y la unidad es despreciable en el denominador.

Con ello:

$$\bar{V}_2 = \left( \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta \tau p} \right) \bar{V}_1 = \left( K_p + \frac{K_i}{p} \right) \bar{V}_1$$

Como  $1/\beta \ll 1$ , el circuito presenta el inconveniente de atenuar la salida, como los anteriores, lo que exige la adición de un amplificador previo.

*Materialización mediante elementos activos*

Se utiliza un integrador seguido de una etapa inversora de ganancia unidad para adecuar la polaridad de salida y entrada (Figura 2.16).

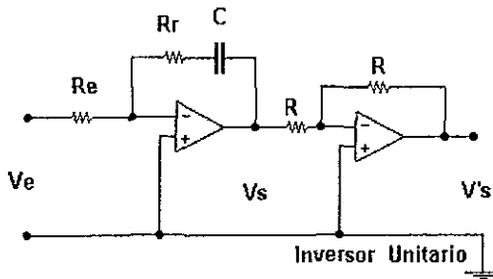


Figura 2.16 Circuito de control PI con A.O.

Olvidándonos de esta última etapa cuyo único efecto es un cambio de signo la función de transferencia del circuito será:

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{Z_s}{Z_e} = \frac{R_r + \frac{1}{C_p}}{R_e} = \frac{R_r}{R_e} + \frac{1}{C_p R_e} = K_p + \frac{K_i}{p}$$

Analizando la respuesta de este circuito ante las entradas más típicas (escalón y rampa velocidad), a fin de ajustar las acciones P e I.

para una entrada escalón  $\bar{V}_s = \frac{V_e}{p}$

Tomando transformadas inversas de Laplace:

$$V_s(t) = K_p V_e + K_i V_e t = V_e (K_p + K_i t)$$

Su representación gráfica es la dada en la Figura 2.17, en la que observamos que la acción proporcional hace que la  $V_s$  sea un escalón de valor distinto a  $V_e$ , mientras que la acción integral supone una rampa de pendiente  $K_i \cdot V_e$ ; de modo que al conjunto supone un retardo en la respuesta  $t_r$  hasta que  $V_s = V_r \Rightarrow V_e = (K_p + K_i t_r)$

$$t_r = \frac{1}{K_i} (1 - K_p) = \left( 1 - \frac{R_r}{R_e} \right)$$

luego  $R_r/R_e > 1$ . Para que dicho retardo no sea excesivamente grande, se hace  $R_e$ , ligeramente superior a  $R_r$  con lo que se consigue  $R_r/R_e \approx 0.9$ .

Por otra parte, para que el sistema no oscile, la parte integral debe ser más pequeña que la proporcional (la pendiente no debe ser excesivamente grande), de forma que  $K_i < K_p$ .

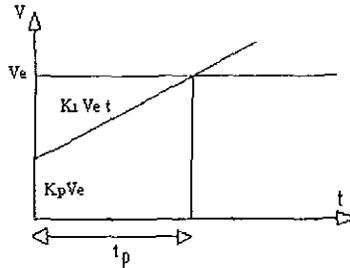


Figura 2.17 Respuesta del circuito PI a un escalón.

En la práctica se hace:

$$K_f = 0.1 K_p \Rightarrow \frac{1}{\tau} = 0.1 \frac{R_f}{R} = 0.09$$

$$\tau = \frac{1}{0.09} = C R$$

Como máximo  $C$  es de  $1 \mu F$ , por lo que no debe ser electrolítico, lo que supone que  $R_e$  será muy grande. En efecto, supuesto  $C = 1 \mu F \Rightarrow R_e = 10 M\Omega$ .

Con lo que este control proporcional integral es muy delicado, pues las tolerancias de fabricación hacen que el valor práctico de  $R_e$  esté muy indeterminado, por lo que se debe ajustar en la práctica de forma experimental.

Idéntica conclusión se obtiene para una entrada en rampa. En efecto, si  $V_e = \omega t$  siendo  $\omega$  una tensión constante.

$$V_s = \frac{\omega}{p^2}$$

$$V_s = \left( K_p + \frac{K_f}{p} \right) V_e = K_p \frac{\omega}{p^2} + K_f \frac{\omega}{p}$$

Tomando transformadas inversas de Laplace:

$$V_s(t) = K_p \omega t + \frac{1}{2} K_i \omega t^2$$

Observamos que la acción proporcional supone una rampa velocidad de pendiente distinta a la entrada mientras que la acción integral se manifiesta en una aceleración que permite alcanzar la entrada con un tiempo de retardo  $t_r$  tal que  $V_e = V_s$ . Como:

$$V_s(t) = \omega \left( K_p + \frac{1}{2} K_i t \right) = V_e \left( K_p + \frac{1}{2} K_i t \right)$$

$$\tau = \frac{2}{K_i} (1 - K_p) = 2 \tau \left( 1 - \frac{R_r}{R} \right)$$

Igual que en el caso anterior  $R_r / R_e > 1$  y se toma  $R_e$  superior a  $R_r$  para conseguir que la relación  $R_r / R_e = 0,9$ . De la misma forma, la acción integral debe ser menor que la proporcional a fin de evitar la inestabilidad; ello supone  $K_i/2 < K_p$  y se hace:

$$\frac{K_i}{2} = 0,1 K_p \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} \tau = 0,1 \frac{R_r}{R} \cdot 0,09$$

$$\tau = \frac{1}{(2 - 0,09)}$$

Haciendo :  $C = 1 \mu\text{F}$  y  $R_e = 5 \text{ M}\Omega$ .

En conclusión observamos que la acción integral se manifiesta en un aumento del grado en  $t$  de la entrada actuante (de escalón a velocidad, de velocidad a aceleración) lo que supone una tendencia a la inestabilidad del sistema.

### 2.3.1.5. Control proporcional derivativo (PD)

Este control queda definido por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La Figura 2.18 presenta un diagrama de bloques de un control PD

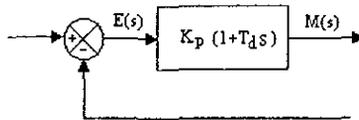


Figura 2.18 Diagrama de bloques de un control PD

y la función de transferencia es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

donde  $K_p$  es la sensibilidad proporcional y  $T_d$  es el tiempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son regulables.

La acción de control derivativo, en ocasiones denominada control de velocidad, es cuando el valor de salida de control es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. El tiempo derivativo es el intervalo de tiempo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional.

Si la señal de error actuante es una función rampa unitaria, como se ve en la Figura 2.19 (a), la salida de control se puede ver en la Figura 2.19 (b), la acción del control derivativo tiene carácter de anticipación; sin embargo el control derivativo nunca puede anticiparse a una acción que aún no ha tenido lugar.

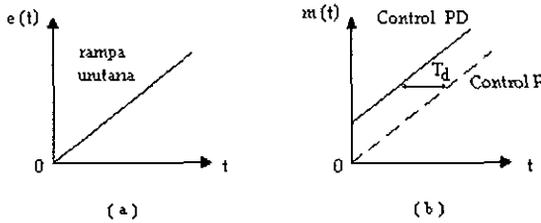


Figura 2.19 (a) y (b) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del control PD.

Mientras la acción de control derivativo tiene la ventaja de ser anticipatoria, las desventajas son que amplifica las señales de ruido y puede producir efectos de saturación en el accionador.

Nunca se puede tener una señal de control derivativo sola, porque este control es efectivo únicamente durante periodos transitorios.

*Materialización mediante elementos pasivos*

Utiliza la red de la Figura 2.20. Su función de transferencia será:

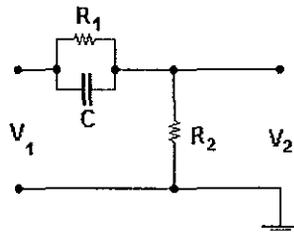


Figura 2.20 Circuito pasivo de control PD

Su función de transferencia será:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1} \frac{1 + p C R_1}{1 + p C R_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

Llamando:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= C R_1 \\ \alpha &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\} \bar{V}_2 = \frac{1 + p \tau}{1 + p \alpha \tau} \bar{V}_1$$

Si hacemos  $\alpha \tau \ll 1$ , el denominador lo podemos aproximar a la unidad, con lo que nos quedaría.

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 \alpha (1 + p \tau) = \underbrace{\alpha}_{\frac{1}{K_p}} \bar{V}_1 + \underbrace{\alpha \tau}_p \dot{\bar{V}}_1$$

Obteniéndose así que  $\bar{V}_2$  es proporcional a  $\bar{V}_1$  y a su derivada (control PD). Para que  $\alpha \tau \ll 1$  necesita que  $\alpha \ll 1$ , pues si  $t$  fuese pequeña tendríamos que despreciar  $p \tau$  frente a la unidad en el numerador, y el término derivada ya no aparece. Como:

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad R_2 \ll R_1$$

En la práctica, el uso de este circuito presenta dos grandes inconvenientes:

- La salida está atenuada, pues  $\bar{V}_2 = \bar{V}_1 \alpha (1 + p \tau)$  y  $\alpha \ll 1$ . Como  $V_1$  es la señal de error (qe) y ésta ya es de por sí pequeña, la  $V_2$  que se obtiene en la salida es excesivamente pequeña. Para evitarlo hay que añadir al sistema una etapa amplificadora previa, que nos aumenta la señal de error antes de introducirla en el circuito pasivo que materializa el control PD, a fin de compensar la atenuación que se produce en dicho circuito (Figura 2.21 (a)),

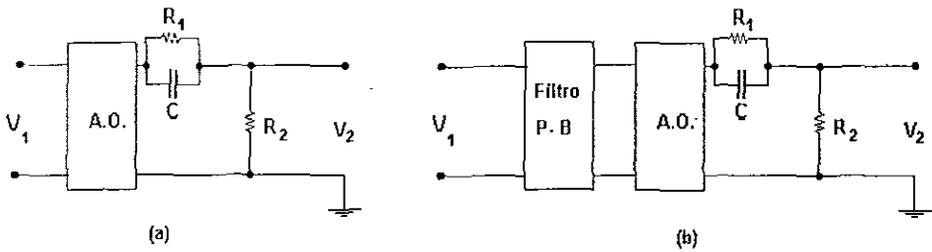


Figura 2.21 Amplificación de la señal de entrada.

La salida del circuito es función de la frecuencia de la señal de entrada, de modo que, para señales de frecuencias elevadas, como el condensador se comporta como un cortocircuito frente a ellas, dichas señales aparecerán en la salida sin atenuar. Como en un servosistema la señal de error es de baja frecuencia, mientras las señales de perturbación y ruido son de frecuencia elevada; la primera será atenuada y las segunda no, por lo que en la salida ambas serían comparables y el funcionamiento del sistema totalmente incorrecto. Para evitarlo, hay que añadir a la entrada un filtro paso-bajas (Figura 2.21.b) que evite el paso de las señales de perturbación.

Con todo ello el circuito práctico para el control PD queda notablemente recargado.

### Materialización mediante elementos activos

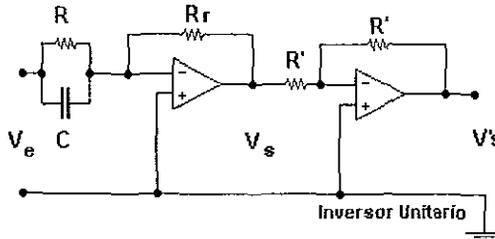


Figura 2.22 Circuito PD con A.O.

Su esquema es el de la Figura 2.22. Su función de transferencia será.

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{z_s}{z_e} = \frac{R_r}{R} \frac{I}{CpR} = \frac{R_r}{R} (1 + CpR)$$

$$\bar{V}_s = \left( \frac{R_r}{R} + CpR_r \right) \bar{V}_e = (K_p + K_D p) \bar{V}_e$$

La acción resultante es, pues del tipo PD, de modo que P depende de las resistencias y D del condensador. Veamos como se ajustan ambas acciones, y para ello consideramos el comportamiento del regulador, frente a una entrada en escalón. Para mayor claridad en las representaciones gráficas prescindimos del inversor de ganancia unitaria en el circuito, con lo que  $V_s$ , es de polaridad opuesta a  $V_e$ .

Con entrada en escalón 
$$\bar{V}_1 = \frac{V_1}{p}$$

Luego:

$$\bar{V}_s = -(K_p + K_D p) \bar{V}_e = -\frac{K_p V_e}{p} - \frac{K_D V_e p}{p}$$

Tomando transformada inversa de Laplace:

$$V_s(t) = -K_p V_e - K_D V_e \delta(t)$$

Luego la  $V_s$ , estacionaria o final es proporcional a la entrada.

La acción derivada sólo se manifiesta en el instante inicial en el que hay una variación de la  $V_e$ , como un impulso de valor:

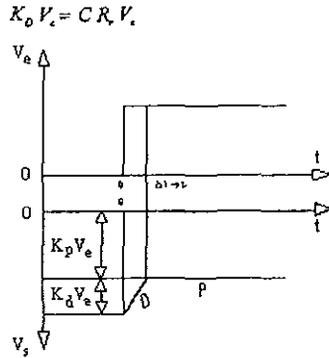


Figura 2.23 Respuesta de circuito PD a entrada escalón

Necesitamos introducir una entrada adicional para poder ajustar la acción D.

Consideramos entrada en rampa.

Para una entrada en rampa  $V_e = \omega t$  donde  $\omega$  es una tensión fija, la transformada de Laplace es  $\omega/p^2$ .

Luego:

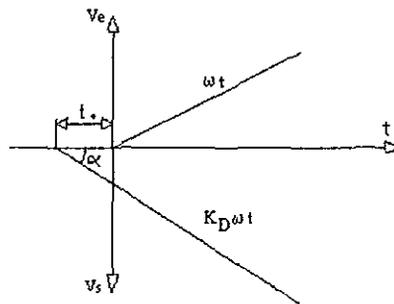


Figura 2.24 Respuesta del circuito PD a entrada rampa velocidad

$$V_s = (K_p + K_D p) V_e = \frac{K_p \omega}{p^2} + \frac{K_D p \omega}{p^2}$$

Tomando transformada inversa:

$$V_s(t) = K_p \omega t + K_D \omega = \frac{R_r}{R} \omega t + C R_r \omega$$

Su representación gráfica es la dada en la Figura 2.24. En ella se observa que la acción proporcional hace que la  $V_s$  sea una rampa con pendiente distinta de la de entrada:

$$\omega' = K \omega = \frac{R_r}{R} \omega$$

Mientras que la acción derivada supone un salto en escalón:  $K_D \omega = C R_r \omega$  que implica un adelanto de tiempo  $t$ , tal que:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_r}{R} \omega = \frac{\omega C R_r}{t_0}$$

luego:

$$t_0 = R C = \tau$$

En conclusión, la salida es una rampa que se adelanta a la acción de la entrada un tiempo igual a la constante de tiempo propia de la red  $RC$  colocada a la entrada del operacional. En función del adelanto buscado se ajusta  $C$  (pues  $R$  fija la impedancia de entrada del circuito), mientras que la acción  $P$  se fija con  $R_r$  o realimentando una fracción  $a$  de la salida.

### 2.3.1.6. Control proporcional integral derivativo (PID)

Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

La ecuación de control combinada está dada por

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

En la Figura 2.25 se puede ver el diagrama de bloques de un control PID

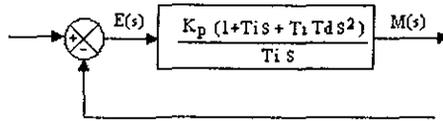


Figura 2.25 Diagrama de bloques de un control PID

con la siguiente función de transferencia

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

donde  $K_p$  representa la sensibilidad proporcional,  $T_d$  el tiempo derivativo y  $T_i$  el tiempo integral.

Si  $e(t)$  es una función rampa unitaria como la de la Figura 2.26 (a), la salida de control  $m(t)$  se tendrá en Figura 2.26 (b).

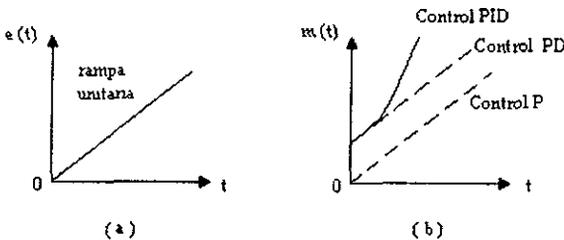


Figura 2.26 (a) y (b) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del control PID.

## Materialización mediante elementos pasivos

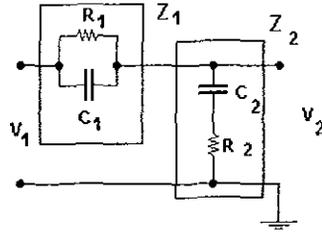


Figura 2.27 Circuito pasivo de control PID

Utiliza la red de la Figura 2.27, en vez de combinar en cascada las correspondientes a los controles PD y PI.

Su función de transferencia:

$$z_1 = R_1 \left| \frac{1}{C_1 p} = \frac{R_1}{R_1 C_1 p + 1} \right. \quad z_2 = R_2 + \frac{1}{C_2 p}$$

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{z_2}{z_1 + z_2} = \frac{(R_1 C_1 p + 1)(R_2 C_2 p + 1)}{(R_1 C_1 p + 1)(R_2 C_2 p + 1) + R_1 C_2 p}$$

llamando:

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad \tau_2 = R_2 C_2$$

$$\frac{\tau_1}{\beta} + \beta \tau_2 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 \quad (\beta > 1)$$

nos queda.

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}{\left( \frac{\tau_1}{\beta} p + 1 \right) (\beta \tau_2 p + 1)}$$

expresión que es la combinación de la función de transferencia de un control en adelanto:

$$\frac{1}{\beta} \frac{\tau_1 p + 1}{\tau_1 p + 1} = \alpha \frac{\tau_1 p + 1}{\alpha \tau_1 p + 1} \quad \left( \alpha = \frac{1}{\beta} < 1 \right)$$

y la de un control en retardo:

$$\beta \cong 1 + \frac{1}{\tau_2 p} \quad (\text{si } \beta \ll 1)$$

Como  $\alpha = 1/\beta \ll 1$ , se sigue presentando el inconveniente, característico de las redes pasivas, de dar una salida muy atenuada.

*Materialización mediante elementos activos*

Utiliza el circuito esquematizado en la Figura 2.28.

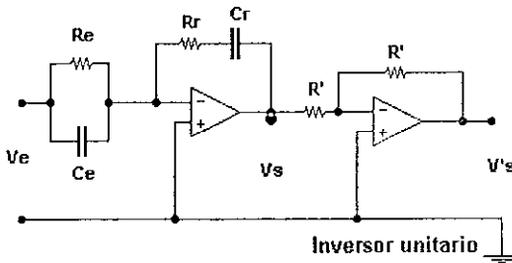


Figura 2.28 Circuito PID con A.O.

Su función de transferencia será:

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{z_s}{z_e} = \frac{R_r + \frac{1}{C_r p}}{R_e} \cdot \frac{1}{C_e p} = K_p + K_D p + \frac{K_I}{p}$$

Observamos que  $K_D$  y  $K_I$  siguen teniendo los mismos valores que en los controles PD Y PI anteriores, únicamente cambia el valor de  $K_p$  ya que ahora:

$$K_p = \frac{R_f}{R_e} + \frac{C_e}{C_r}$$

depende tanto de la relación de resistencias como de la de capacitores. Por ello el ajuste se realiza fijando primero  $K_i$  (precisión deseada) y después  $K_D$  (estabilidad requerida) con lo que la  $K_p$  queda completamente determinada.

#### 2.4 Modelado de sistemas térmicos.

En los sistemas térmicos dos de las variables que se pueden considerar son: temperatura  $T$  y flujo de calor,  $q$ . Por lo que solamente se tomarán en cuenta dos tipos de elementos: resistencias y capacitancias térmicas.

##### a) Resistencia térmica.

El flujo de calor a través de una *resistencia térmica*, cuyos extremos se mantienen a diferente temperatura, (Figura 2.29) está dada por.

$$q = \frac{1}{R_t} (T_1 - T_2)$$

Esta es la idealización del flujo de calor a través de un cuerpo.

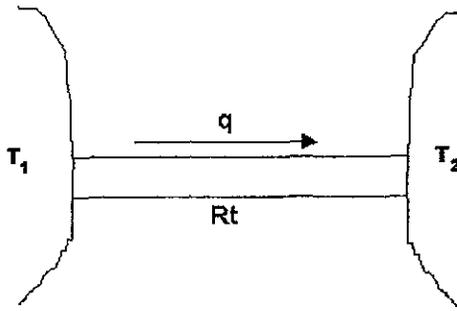


Figura 2.29 Modelado de una resistencia térmica.

b) Capacitancia térmica

No sólo puede haber flujo de calor a través de los cuerpos; también es factible que éstos almacenen calor, dando como resultado un aumento de temperatura en el cuerpo. El cambio de temperatura de un cuerpo de masa,  $M$  cuando recibe un flujo neto de calor  $q$ , está dado por

$$M c_p \frac{dT}{dt} = q$$

donde  $C_p$  es el calor específico del cuerpo y  $T$  su temperatura. La cantidad  $C_t = M c_p$  se denomina *capacitancia térmica* (Figura 2.30).

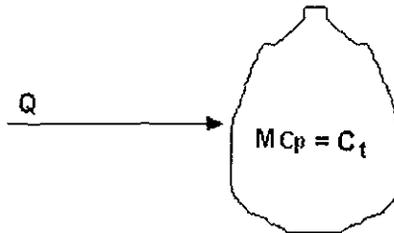


Figura 2.30 Modelado de una capacitancia térmica.

### 2.4.1 Procedimiento para modelar un sistema.

Siempre ha surgido la pregunta de ¿cómo se deben seleccionar las variables que representan el estado de un sistema?. En general se deberán de seleccionar aquellas variables con las cuales se pueda calcular la energía que almacenan algunos elementos. Para ello es conveniente proceder de la siguiente forma:

- i. Escribanse las ecuaciones del sistema
- ii. Escribanse las ecuaciones de conjunto de sistema
- iii. Selecciónense como posibles variables de estado aquellas que aparecen derivadas en alguna de las ecuaciones obtenidas.
- iv. Verifique que las variables seleccionadas sean independientes, esto es, que no estén ligadas por alguna relación algebraica.
- v. Elimine todas aquellas variables redundantes.
- vi. Exprese las variables de estado en la forma:

$$\dot{x} = f(x, u, t).$$

- vii. Determine la salida en función de las variables de estado como

$$y = g(x, u, t).$$

Si se satisfacen las condiciones (vi) y (vii),  $x$  representa el estado del sistema.

## 2.5 Temperatura

Propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico. El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el calor o frialdad relativos y de la observación de que el suministro de calor a un cuerpo conlleva un aumento de su temperatura mientras no se produzca la fusión o ebullición. En el caso de dos cuerpos con temperaturas diferentes, el calor fluye del más caliente al más frío hasta que sus temperaturas sean idénticas y se

alcance el equilibrio térmico. Por tanto, los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: *la temperatura* es una propiedad de un cuerpo y *el calor* es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

Los cambios de temperatura tienen que medirse a partir de otros cambios en las propiedades de una sustancia. Por ejemplo, el termómetro de mercurio convencional mide la dilatación de una columna de mercurio en un capilar de vidrio, ya que el cambio de longitud de la columna está relacionado con el cambio de temperatura. Si se suministra calor a un gas ideal contenido en un recipiente de volumen constante, la presión aumenta, y el cambio de temperatura puede determinarse a partir del cambio en la presión según la ley de Gay-Lussac, siempre que la temperatura se exprese en la escala absoluta.

### 2.5.1 Escalas de temperatura

Una de las primeras escalas de temperatura, todavía empleada en los países anglosajones, fue diseñada por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit. Según esta escala, a la presión atmosférica normal, el punto de solidificación del agua (y de fusión del hielo) es de 32 °F, y su punto de ebullición es de 212 °F. La escala centígrada o Celsius, ideada por el astrónomo sueco Anders Celsius y utilizada en casi todo el mundo, asigna un valor de 0 °C al punto de congelación del agua y de 100 °C a su punto de fusión. En ciencia, la escala más empleada es la escala absoluta o Kelvin, inventada por el matemático y físico británico William Thomson, Lord Kelvin. En esta escala, el cero absoluto, que está situado en -273.15°C, corresponde a 0 K, y una diferencia de un kelvin equivale a una diferencia de un grado en la escala centígrada.

## 2.5.2 Transferencia de calor.

En física, proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

### 2.5.2.1 Conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Barón Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor en un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividad térmica elevada y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen una conductividad de cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes térmicos. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del

calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

### 2.5.2.2 Convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la falta de uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior —que está más frío— desciende, mientras que al aire cercano al panel interior —más caliente— asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

### 2.5.2.3 Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantificado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor de dos físicos austríacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son excelentes emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de

onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2,878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayores, correspondientes al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neto hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula.

## Conclusión

En este capítulo se define lo que es control, el cual consiste en seleccionar de un conjunto de elementos, aquellos que aplicados a un sistema fijo hagan que se comporte de una manera deseada. Para poder controlar un sistema deberá tener tres elementos: una entrada, una planta y una salida; por lo que el problema de control se puede manejar según la función de las variables, esto es si la entrada y salida son funciones del tiempo, el problema se puede resolver por "malla abierta" o por "malla cerrada" o de realimentación el cual genera la entrada en función de la salida.

Definimos el concepto de sistema, el cual es un conjunto de elementos (entrada-salida) que trabajan en conjunto para lograr un fin; existen dos tipos de sistemas que son los *causales*, cuando la salida del sistema en un instante no depende del valor de la entrada en instantes posteriores y los sistemas *no causales* cuando la salida en un instante si depende del valor de la entrada en instantes posteriores.

Se describe el procedimiento para modelar un sistema, esto es la selección de variables que representen el estado del mismo. En general se deben seleccionar aquellas variables con las cuales se puede calcular la energía que almacenan algunos elementos, escribiendo las ecuaciones del sistema y el conjunto del sistema, seleccionar variables de estado, verificar que las variables seleccionadas sean independientes, determinar la salida en función de las variables de estado, etc.

Por otro lado definimos también el concepto de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas. Existen diferentes tipos de escalas para medir la temperaturas, para el desarrollo de esta tesis escogimos la escala centígrada o Celsius, la cual asigna  $0^{\circ}\text{C}$  al punto de congelación del agua y  $100^{\circ}\text{C}$  al punto de fusión.

Mientras que el calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción, en donde estos procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Estos procesos de transmisión de calor también pueden producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua.

## Capítulo 3

### Descripción del Microcontrolador

---

Un microcontrolador es un dispositivo utilizado para programar y automatizar varias tareas que antes se hacían con varios dispositivos analógicos, este viene a sustituir los complejos y caros sistemas que se utilizaban, con un sólo integrado y algunos periféricos adicionales, debido a que, el microcontrolador está compuesto por un microprocesador, memorias y dispositivos de entrada-salida (E/S), pero pueden tener algunos otros elementos como temporizadores, convertidores, etcétera.

En un microcontrolador el sistema de memoria se usa principalmente para dos propósitos: disponer de un sistema de almacenamiento de datos u operaciones y disponer de un medio para almacenar el programa (un grupo de comandos e instrucciones).

Es por esta razón que en el presente capítulo describiremos el microcontrolador M68HC11, el cual usamos para la automatización del control de temperatura en el horno a diseñar (o de pruebas).

Es sumamente importante conocer el funcionamiento y la descripción de cada una de las terminales del microcontrolador, para poder programarlo de acuerdo a nuestras necesidades.

### 3.1 Historia del microprocesador

El primer microprocesador fue el Intel 4004, producido en 1971. Se desarrolló originalmente para una calculadora, y resultaba revolucionario para su época. Contenía 2,300 transistores en un microprocesador de 4 bits que sólo podía realizar 60,000 operaciones por segundo. El primer microprocesador de 8 bits fue el Intel 8008, desarrollado en 1979 para su empleo en terminales informáticas. El Intel 8008 contenía 3,300 transistores. El primer microprocesador realmente diseñado para uso general, desarrollado en 1974, fue el Intel 8080 de 8 bits, que contenía 4,500 transistores y podía ejecutar 200,000 instrucciones por segundo. Los microprocesadores modernos tienen una capacidad y velocidad mucho mayores. Entre ellos figuran el Intel Pentium Pro, con 5.5 millones de transistores; el UltraSparc-II, de Sun Microsystems, que contiene 5.4 millones de transistores; el PowerPC 620, desarrollado conjuntamente por Apple, IBM y Motorola, con 7 millones de transistores, y el Alpha 21164A, de Digital Equipment Corporation, con 9.3 millones de transistores.

### 3.2 Microprocesador

El microprocesador es un circuito electrónico que actúa como unidad central de proceso de un ordenador, proporcionando el control de las operaciones de cálculo.

El microprocesador es un tipo de circuito sumamente integrado. Los circuitos integrados, también conocidos como microchips o chips, son circuitos electrónicos complejos formados por componentes extremadamente pequeños en una única pieza plana de poco espesor, de un material conocido como semiconductor. Los microprocesadores modernos incorporan hasta 10 millones de transistores (que actúan como amplificadores electrónicos, osciladores o, más a menudo, como conmutadores), además de otros componentes como resistencias, diodos, condensadores y conectadores, todo ello en una superficie comparable a la de un sello postal.

### 3.3 Arquitectura de los microprocesadores

Un microprocesador consta de varias secciones diferentes. La unidad aritmético-lógica (ALU, Arithmetic Logic Unit) efectúa cálculos con números y toma decisiones lógicas; los registros son zonas de memoria especiales para almacenar información temporalmente; la unidad de control decodifica los programas; los buses transportan información digital a través del chip y de la computadora; la memoria local se emplea para los cálculos realizados en el mismo chip. Los microprocesadores más complejos contienen a menudo otras secciones; por ejemplo, secciones de memoria especializada denominadas memoria caché, que sirven para acelerar el acceso a los dispositivos externos de almacenamiento de datos. Los microprocesadores modernos funcionan con un bus de 64 bits (un bit es un dígito binario, una unidad de información que puede ser un uno o un cero): esto significa que pueden transmitirse simultáneamente 64 bits de datos.

Un circuito oscilador situado en el ordenador proporciona una señal de sincronización, o señal de reloj, para coordinar todas las actividades del microprocesador. La velocidad de reloj de los microprocesadores más avanzados es de unos 300 MegaHertz (MHz) — 300 millones de ciclos por segundo —, lo que permite ejecutar 100 millones de instrucciones cada segundo.

### 3.4 Fabricación de microprocesadores

Los microprocesadores se fabrican empleando técnicas similares a las usadas para otros circuitos integrados, como chips de memoria. Generalmente, los microprocesadores tienen una estructura más compleja que otros chips, y su fabricación exige técnicas extremadamente precisas.

La fabricación económica de microprocesadores exige su producción masiva. Sobre la superficie de una oblea de silicio se crean simultáneamente varios cientos de grupos de

circuitos. El proceso de fabricación de microprocesadores consiste en una sucesión de deposición y eliminación de capas muy finas de materiales conductores, aislantes y semiconductores, hasta que después de cientos de pasos se llega a un complejo "bocadillo" que contiene todos los circuitos interconectados del microprocesador. Para el circuito electrónico sólo se emplea la superficie externa de la oblea de silicio, una capa de unas 10 micras de espesor (aproximadamente 0.01 mm). Entre las etapas del proceso figuran la creación de sustrato, la oxidación, la litografía, el grabado, la implantación iónica y la deposición de capas.

La primera etapa en la producción de un microprocesador es la creación de un sustrato de silicio de enorme pureza, una rodaja de silicio en forma de una oblea redonda pulida hasta quedar lisa como un espejo. En la actualidad, las obleas más grandes empleadas en la industria tienen 200 mm de diámetro.

En la etapa de oxidación se coloca una capa eléctricamente no conductora, llamada dieléctrico. El tipo de dieléctrico más importante es el dióxido de silicio, que se "cultiva" exponiendo la oblea de silicio a una atmósfera de oxígeno en un horno a unos 1,000 °C. El oxígeno se combina con el silicio para formar una delgada capa de óxido de unos 75 angstroms<sup>2</sup> de espesor.

Casi todas las capas que se depositan sobre la oblea deben corresponder con la forma y disposición de los transistores y otros elementos electrónicos. Generalmente esto se logra mediante un proceso llamado fotolitografía, que equivale a convertir la oblea en un trozo de película fotográfica y proyectar sobre la misma una imagen del circuito deseado. Para ello se deposita sobre la superficie de la oblea una capa fotosensible cuyas propiedades cambian al ser expuesta a la luz. Los detalles del circuito pueden llegar a tener un tamaño de sólo 0.25 micras. Como la longitud de onda más corta de la luz visible es de unas 0.5 micras, es necesario emplear luz ultravioleta de baja longitud de onda para resolver los detalles más

---

<sup>2</sup> Un angstrom es una diezmilmillonésima de metro

pequeños. Después de proyectar el circuito sobre la capa fotoresistente y revelar la misma, la oblea se graba: esto es, se elimina la parte de la oblea no protegida por la imagen grabada del circuito mediante productos químicos (un proceso conocido como grabado húmedo) o exponiéndola a un gas corrosivo llamado plasma en una cámara de vacío especial.

En el siguiente paso del proceso, la implantación iónica, se introducen en el silicio impurezas como boro o fósforo para alterar su conductividad. Esto se logra ionizando los átomos de boro o de fósforo (quitándoles uno o dos electrones) y lanzándolos contra la oblea a grandes energías mediante un implantador iónico. Los iones quedan incrustados en la superficie de la oblea.

En el último paso del proceso, las capas o películas de material empleadas para fabricar un microprocesador se depositan mediante el bombardeo atómico en un plasma, la evaporación (en la que el material se funde y posteriormente se evapora para cubrir la oblea) o la deposición de vapor químico, en la que el material se condensa a partir de un gas a baja presión o a presión atmosférica. En todos los casos, la película debe ser de gran pureza, y su espesor debe controlarse con una precisión de una fracción de micra.

Los detalles de un microprocesador son tan pequeños y precisos que una única mota de polvo puede destruir todo un grupo de circuitos. Las salas empleadas para la fabricación de microprocesadores se denominan salas limpias, porque el aire de las mismas se somete a un filtrado exhaustivo y está prácticamente libre de polvo. Las salas limpias más puras de la actualidad se denominan de clase 1. La cifra indica el número máximo de partículas mayores de 0.12 micras que puede haber en un pie cúbico de aire (0.028 metros cúbicos). Como comparación, un hogar normal sería de clase 1 millón.

### 3.5 Microcontrolador

Un microprocesador no es un ordenador completo. No contiene grandes cantidades de memoria ni es capaz de comunicarse con dispositivos de entrada —como un teclado, un joystick o un ratón— o dispositivos de salida como un monitor o una impresora. Un tipo diferente de circuito integrado llamado microcontrolador es de hecho una computadora completa situada en un único chip, que contiene todos los elementos del microprocesador básico además de otras funciones especializadas. Los microcontroladores se emplean en videojuegos, reproductores de vídeo, automóviles y otras máquinas dedicadas como es el propósito del controlador de esta tesis.

Un microcontrolador (Figura 3.1) esta compuesto por un microprocesador él cual establece comunicación con diversos dispositivos por medio de tres canales o buses, que son:

- 1) Canal de direcciones
- 2) Canal de datos
- 3) Canal de control

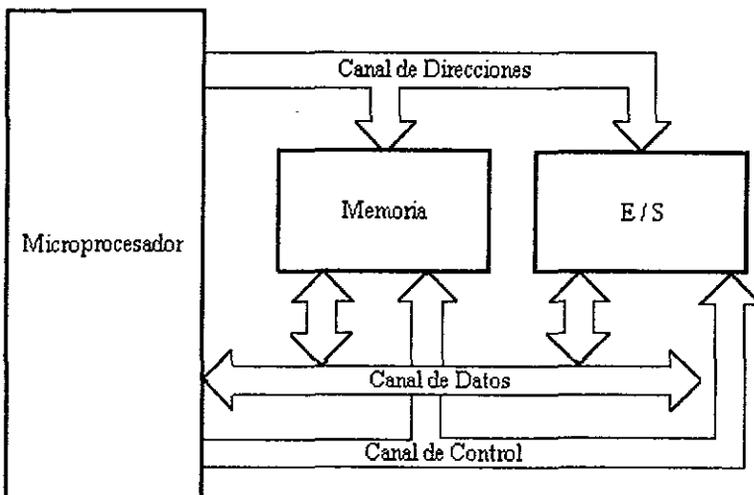


Figura 3.1 Esquema básico de un microcontrolador

Estos canales conectan al microprocesador a cada uno de los elementos de memoria y de E/S, de manera que los datos y la información puedan fluir entre el microprocesador y cualquiera de estos elementos.

#### *Operación de Escritura*

Cuando el microprocesador envía datos a otro elemento, se le llama operación de escritura y escribe en el elemento seleccionado.

#### *Operación de Lectura*

Cuando el microprocesador recibe datos de otro elemento, se le denomina operación de lectura y lee del elemento seleccionado.

Los términos "lectura" y "escritura" siempre se refieren a la operación realizada por el microprocesador.

Las funciones de los tres canales son:

### **3.5.1 Canal de Direcciones**

Este es un canal unidireccional, debido a que la información fluye en un solo sentido, del microprocesador a la memoria o a los dispositivos de E/S. Cuando el microprocesador desea comunicarse (leer o escribir) con alguna localidad de memoria o dispositivo de E/S, coloca la dirección adecuada en sus salidas de dirección, para que sea transmitida a través del canal de direcciones. El dispositivo que está implicado en la transferencia de datos, es seleccionado mediante la información digital presente en este bus.

El número de localidades de memoria o de dispositivos de E/S a los que se puede seleccionar (direccionar) depende del número de líneas de dirección que se posean. Un microprocesador con 20 líneas de dirección genera  $2^{20} = 1,048,576$  posibles direcciones diferentes. Sin embargo, la capacidad de direccionamiento no solo depende del número de líneas de dirección que posean sino de dos factores:

1. algunos emplean el total de sus líneas de dirección para selección de memoria y un número menor de esas líneas para dispositivos de E/S y
2. del tipo de arquitectura de la ranura de expansión.

### 3.5.2 Canal de Datos

La transferencia de datos entre el microprocesador y los otros elementos se produce en este canal. El canal de datos está formado por un cierto número de bits y es bidireccional, lo cual significa que la información se intercambia mediante un número de vías paralelas que transportan los bits hacia y desde el microprocesador.

Las terminales de datos del microprocesador pueden ser entradas o salidas, dependiendo si realiza una operación de lectura o escritura. Durante una operación de lectura actúan como entradas y reciben los datos que se han colocado en el canal de datos, por la memoria o el dispositivo de E/S, seleccionado por la dirección presente en el canal de direcciones. En una operación de escritura, las terminales actúan como salidas y colocan datos en el canal respectivo, para su envío a la localidad de memoria o al dispositivo de E/S seleccionado.

Los bits que se transmiten en el canal de datos los determina el microprocesador, es decir, el número de bits presentes en este canal sólo puede ser igual o menor al número de datos del microprocesador, pero nunca mayor.

### 3.5.3 Canal de Control

El canal de control transporta las señales que sincronizan la colocación de la información en los canales de datos y direcciones, con las actividades del microprocesador y los dispositivos de E/S o memoria. Algunas de estas señales, son señales que él envía a los otros elementos para indicarles qué tipo de operación se espera en ese momento. A su vez, los dispositivos de E/S pueden enviar señales de control al microprocesador.

La comprensión de las funciones que desempeña un microprocesador es de suma importancia para la realización de una interfaz, conocer cada uno de sus componentes y la función que realizan, son de vital importancia para la selección del dispositivo, las características a tomar en cuenta las podemos resumir de la siguiente forma:

- ↻ Entrada: Transferencia de datos desde un dispositivo externo hacia el microcontrolador.
- ↻ Salida: Transferencia de datos desde el microprocesador a un dispositivo externo.
- ↻ Pulsos de Sincronización: Generar los pulsos de sincronización apropiados para entrada o salida, en la transferencia de datos, para coordinar las acciones de un dispositivo externo en particular y el microcontrolador.
- ↻ Manejo de interrupciones: Detectar y atender las señales de interrupción que llegan al microprocesador desde los dispositivos externos.

### 3.6 Descripción básica del microcontrolador M68HC11

El microcontrolador es un circuito que interactúa con otros circuitos para integrar un sistema digital de cómputo y sus principales funciones son:

- ↻ Busca instrucciones y datos desde la memoria.
- ↻ Transfiere datos desde y hacia dispositivos de entrada y salida.
- ↻ Decodifica instrucciones.

- ↻ Realiza operaciones lógicas y aritméticas solicitadas a través de instrucciones.
- ↻ Provee las señales de tiempo y control para todos los elementos del sistema.

El microcontrolador que utilizaremos en la tesis es el M68HC11 de tecnología HCMOS, esta formado por un semiconductor de alta densidad metal-óxido. Este circuito integrado CI esta constituido por una Unidad Microcontroladora (MCU – MicroController Unit) de alto desempeño que contiene 12 kbytes de memoria de sólo lectura (ROM), 512 bytes de memoria eléctricamente borrrable (EEPROM - Electrically Erasable Programmable) y 512 bytes de memoria de acceso aleatorio (RAM). Este microcontrolador es de alta velocidad y baja potencia, e incluye un bus multiplexor.

### Características Generales

- ↻ Tecnología HCMOS (baja potencia y alta velocidad)
- ↻ ROM de 12 kbytes
- ↻ EEPROM con protección de bloque de memoria para seguridad de 512 bytes
- ↻ RAM de 512 kbytes
- ↻ Timer con un registro de 16 bit
  - Cuatro salidas de comparación
  - Tres entradas de captura
  - Una entrada de captura o salida de comparación
- ↻ Acumuladores de 8 bit
- ↻ Interrupción de tiempo real
- ↻ Computadora Operando Adecuadamente (COP - Computer Operating Properly)
- ↻ Dos puertos seriales: síncrono y asíncrono

- ⚡ Convertidor analógico digital (A/D) de 8 entradas multiplexadas
- ⚡ 38 pins de entrada / salida (I/O)
  - 16 pins bidireccionales I/O
  - 11 pins de solo entrada y 11 pins de sólo salida
- ⚡ Cuatro modos de operación, dos formas normales (mono chips y modo expandido) y dos formas especiales (Test o prueba y bootstrap)

La Figura 3.2 muestra la estructura del M68HC11.

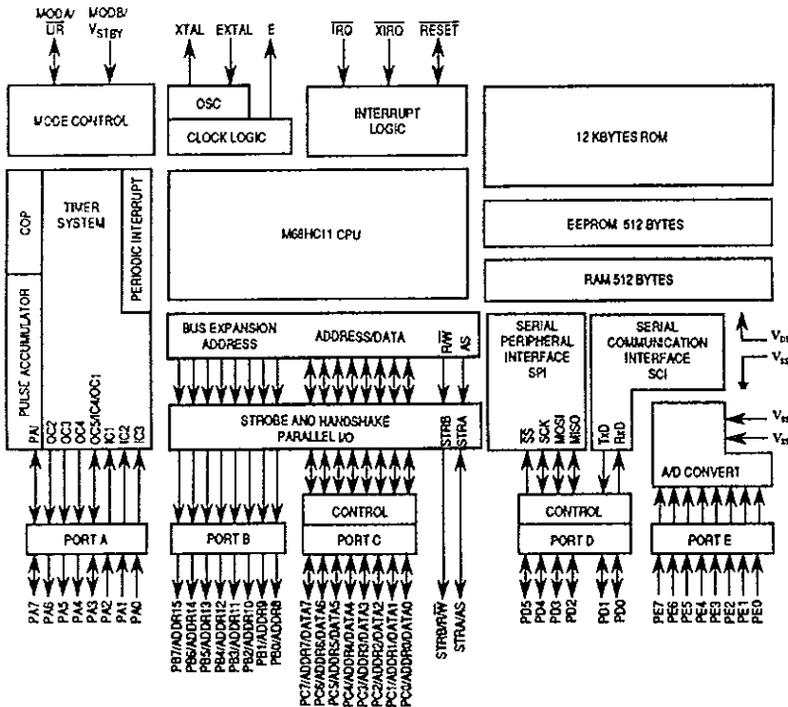


Figura 3.2 Esquema básico del microcontrolador M68HC11

### 3.7 Descripción de terminales del M68HC11E9

El conocimiento de las funciones que desempeñan las terminales del M68HC11 es básico para comprender su funcionamiento y programación. La descripción se basa en la Figura 3.3.

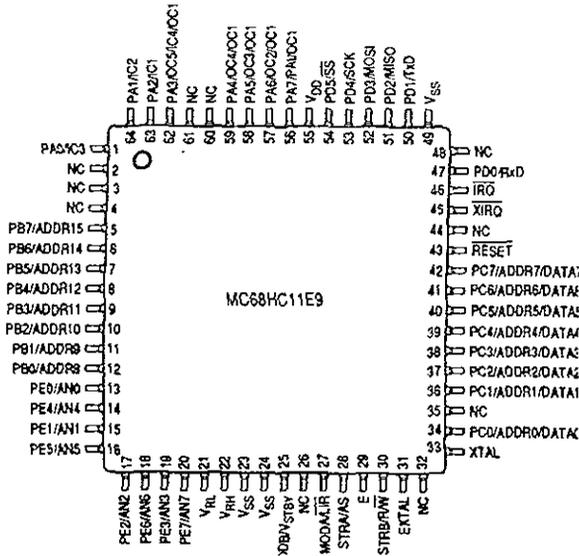


Figura 3.3 Descripción de las terminales del microcontrolador M68HC11E9

#### V<sub>SS</sub> (Tierra)

Esta terminal es el nivel de referencia de voltaje y debe ser igual a 0 volts.

#### V<sub>DD</sub> (Alimentación)

El voltaje aplicado al MCU es a través de esta terminal y debe ser igual a 5 V. (nominales).

### **RESET (Reinicio)**

Es una señal de control bidireccional, el reset actúa para inicializar al MCU, e indica si se detecta una falla interna en el monitor del reloj o en el COP.

El reset realiza lo siguiente:

1. Todas las instrucciones son limpiadas con "0".
2. Todas las interrupciones enmascaradas se ponen con "1".
3. Todos los registros de direcciones de datos son limpiados en "0" (entrada).
4. El apuntador al stack inicia en \$00 (parte alta del stack).
5. La instrucción de STOP solamente es inicializada.

### **XTAL, EXTAL (Cristal controlador y Reloj de entrada externo)**

Estas terminales suministran la interfaz para cualquier oscilador o reloj compatible CMOS.

En la terminal XTAL se pueden conectar cargas capacitivas hacia tierra para evitar la emisión de ruido. La salida del XTAL puede estar amortiguada con una alta impedancia o puede usarse para conducir la entrada del EXTAL a otro M68HC11.

### **E-Clock Output (Reloj de salida)**

La terminal es la conexión de salida para generar un reloj. La frecuencia del reloj E de salida es un cuarto de la frecuencia de entrada de las terminales XTAL y EXTAL. Cuando la salida del reloj E-clock se encuentra en estado bajo se inicia un proceso interno, cuando el estado es alto los datos son accedados. Todos los relojes incluyen el E-clock y estos están detenidos cuando el MCU se encuentra en estado de STOP.

### **IRQ Interrupt Request (Petición de Interrupción)**

El IRQ suministra un medio para aplicar asincrónicamente una petición de interrupción del MCU.

Cuando una interrupción externa o por timer ocurre, la interrupción no es servida inmediatamente y es considerada pendiente. Después que la ejecución de la actual instrucción es completada, la interrupción enmascarada puede ser atendida. Si ambas interrupciones la externa y la de timer están pendientes, la interrupción externa es atendida primero, comúnmente, la petición de interrupción del timer permanece pendiente a menos que sea liberada durante el servicio a la rutina por la interrupción externa.

### **XIRQ Nonmaskable interrupt (Interrupción no enmascarda)**

La salida XIRQ suministra un medio de petición de interrupción enmascarada después del reset de inicio. Durante el reset, un "x" byte en la condición de registro de código (CCR) es colocado y ninguna interrupción está oculta (masked) hasta que el software del MCU lo permita.

La salida del XIRQ es un nivel sensitivo, puede estar conectada a múltiples fuentes o red, con una conexión externa de un resistor a  $V_{DD}$ . El XIRQ con frecuencia se usa para determinar interrupciones de falla en fuentes de alimentación.

### **MODA y MODB (MODA/LIR and MODB/ $V_{STBY}$ )**

Usando MODA y MODB se puede seleccionar uno de los cuatro modos de operación. La terminal LIR proporciona un open-drain output que indica la ejecución de una instrucción que comenzó. Un ciclo de reloj ocurre durante la ejecución de cada instrucción. La señal del LIR es baja durante el primer ciclo de E-clock de cada instrucción.

La terminal  $V_{STBY}$  es usado para suministrar potencia a la RAM en estado de espera (standby) Cuando el voltaje en esta terminal es mayor a 0.7 volt (arriba del voltaje  $V_{DD}$ ), la RAM de 512 byte y el reset lógico están forzados a esta señal en lugar de la entrada del  $V_{DD}$ . Esto permite que el contenido de la RAM está retenido sin el  $V_{DD}$  aplicado al MCU.

### $V_{RL}$ y $V_{RH}$

Estas dos entradas proveen la referencia del voltaje para el circuito del convertidor analógico digital. El  $V_{RL}$  es una referencia baja típica a "0" volts,  $V_{dc}$  y  $V_{RH}$  es la referencia alta. Para conectar el convertidor A/D se recomienda utilizar a  $V_{RH}$  menor a los 3  $V_{dc}$  y mayor que  $V_{RL}$ ; para  $V_{RL}$  y  $V_{RH}$  deberán estar entre  $V_{SS}$  y  $V_{DD}$ .

### STRA / AS

Esta terminal ejecuta dos funciones separadas, dependiendo del modo de operación. En el modo "single-chip", STRA ejecuta una función de handshake (entrada strobe) a la entrada. (en este modo multiplexado AS provee una función de dirección strobe). AS puede ser usado para demultiplexar las direcciones y datos al puerto C.

### STRB / R / W (Strobe B and Read/Write)

Esta terminal actúa como una salida strobe o como un indicador del bus de datos dependiendo del modo de operación. En el modo "single-chip" STRB actúa como strobe programable para handshake como otro mecanismo en comunicación paralela.

En modo de operación expandido multiplexado R/W, es usado para indicar la dirección de transferencia en el bus de datos externo. Un nivel bajo en la terminal R/W indica que se comienza a escribir en el bus de datos externo. Un nivel alto indica un ciclo de lectura.

### Port Signals (Señales de los puertos)

Esta terminal tiene diferentes modos de operación y funciona para los puertos A, D y E que son independientes del modo de operación. Sin embargo el puerto B y C están afectados por el modo de operación según se muestra en la Tabla 3.1.

En el modo “single-chip” el puerto B provee 8 señales de propósito general de salida. Cuando el microcontrolador se encuentra en el modo “expandido”, el puerto B se convierte en la parte alta del bus de direcciones.

Cuando el MCU está en modo “single-chip” el puerto C provee 8 señales de propósito general de entrada/salida. Cuando el microcontrolador se encuentra en el modo de operación expandido multiplexado, el puerto C está multiplexado con el bus de direcciones (parte baja) y el bus de datos (D0 – D7).

<b>MODA</b>	<b>MODB</b>	<b>Descripción</b>
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>Normal Single Chip</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>Normal Expandido</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Especial Bootstrap</b>
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Especial Test</b>

Tabla 3.1 Resumen de modo de selección del hardware

### 3.8 Unidad Central de Proceso (CPU - Central Process Unit)

El CPU controla las funciones realizadas por el sistema; este llama las instrucciones de la memoria, las decodifica y las ejecuta. Utiliza la memoria y los puertos de entrada y salida de la forma que la ejecución de las instrucciones lo requiera. Generalmente, el tiempo requerido para la ejecución de una cierta instrucción es un múltiplo de la velocidad de reloj.

La Unidad Aritmética Lógica (ALU) realiza las operaciones aritméticas sobre los operandos y también realiza los procesos lógicos. Las operaciones llevadas a cabo en la ALU pueden proveer resultados complejos o parciales dependiendo de los problemas a resolver.

## Arquitectura del CPU

El CPU de cualquier sistema procesador contiene los siguientes grupos de unidades funcionales interconectadas:

1. Registro y Controladores
2. Unidad Aritmética Lógica
3. Circuitería de tiempos y control

### 3.8.1 Registro y Contadores

Los *registros* se utilizan para el almacenamiento temporal de bits en el CPU, estos se pueden diseñar con entrada y salida en serie o paralelo. Normalmente los registros se inician en ceros al principio del programa.

Los *contadores* son dispositivos que registran y mantienen la cuenta de un número de pulsos o bits. Un contador puede contar el sentido positivo o negativo. El contador positivo se borra igualando todos los bits a cero y se actualiza su valor incrementándolo cada vez que le llegue un bit.

El *acumulador* es el principal registro del microcontrolador y con frecuencia también es el puerto de comunicación con dispositivos periféricos. CPU. Usualmente el acumulador se

considera como un registro de propósito general en la mayoría de los microprocesadores y almacena uno de los operandos que usa la ALU para realizar todo tipo de operación.

El acumulador puede trabajar como registro fuente o registro destino. Si el programa llama el contenido de cierta localidad de memoria para ser sumado al actual contenido del acumulador y el resultado ser devuelto a la misma, o cualquier otra posición de memoria; en tal caso el acumulador funciona como registro fuente.

En muchas ocasiones, el acumulador está diseñado para mantener un total acumulativo o progresivo de todos los números que se le transfieren. Cada número que se le transfiere se suma sucesivamente a la suma previa. Así mismo, los acumuladores pueden diseñarse para que, bajo el control del programa, resten la cantidad de entrada a la ya existente.

El *contador de programa*; las instrucciones que constituyen el programa están almacenadas en posiciones sucesivas de la memoria del programa, que puede consistir en varios chips de memoria ROM en los microprocesadores. A cada posición de memoria se le asigna un número o código único, llamado dirección. Para ejecutar el programa en la secuencia correcta, el CPU debe conocer en que posición de memoria debe buscar la próxima instrucción.

### 3.8.2 Unidad Aritmética Lógica

Todos los procesadores tienen una ALU donde se desarrollan los cálculos aritméticos y varias operaciones lógicas. La ALU utiliza métodos binarios para representar y operar números.

La ALU contiene bits de estado que registran e indican ciertas condiciones específicas que pueden suceder durante las manipulaciones propias de la unidad. Estos bits de estado están indicados por el estado de flip-flops R/S. Un microprocesador puede disponer de uno a 16 bits de estado. Las condiciones de estado están agrupadas en un registro dedicado, llamado registro de estado.

### 3.8.3 Circuitería de tiempos y control

Utilizando las entradas de reloj, el CPU asegura la ejecución adecuada y la secuencia de eventos requerida para el proceso de la instrucción específica.

#### Secuencia de operaciones básicas

El CPU trabaja de manera cíclica; es decir, buscar una instrucción en la memoria de programa, la codifica y ejecuta las operaciones indicadas por la instrucción. A continuación busca la siguiente instrucción y el proceso se repite una y otra vez hasta haber ejecutado el programa completo. La secuencia completa se sincroniza con el reloj.

El número de fases de reloj depende básicamente del tipo de circuitería con la que se construyó el sistema. Por supuesto, es posible disponer de un reloj de más de dos fases. Un reloj de dos fases puede tener o no, superposición entre los trenes de pulsos.

El intervalo de tiempo entre puntos idénticos de dos pulsos de reloj adyacentes se llama periodo. El tiempo necesario en los procesos de búsqueda y ejecución de una única instrucción se conoce como Ciclo de Máquina. Una porción del ciclo de máquina que puede identificarse con una actividad claramente definida se denomina fase del ciclo de máquina. Para completar una fase, es necesario el menos uno, y normalmente más periodos de reloj. A su vez, un ciclo de máquina está formado por varias fases.

### **Búsqueda de Instrucciones**

La primera fase del ciclo de máquina busca la instrucción. El contenido del contador de programa se envía a la memoria de programa para ser usado como dirección de la instrucción. La memoria de programa transmite entonces la instrucción al CPU. Se carga la primera palabra (o byte) de la instrucción en el registro de instrucciones. Si la instrucción es de tipo multipalabra se requiere más ciclos de máquina para buscar el resto de la instrucción. El contador de programa se incrementa y queda preparado para buscar la próxima instrucción. Finalmente el CPU ejecuta la operación indicada por la instrucción.

### **Operación de Lectura de Datos en Memoria**

Suponiendo que una instrucción en particular requiere la lectura de datos de la memoria de datos, para su instrucción en el CPU; este recibe la instrucción y la almacena en el registro de instrucciones. Después de recibir la dirección efectiva y la orden de lectura del CPU, la memoria responde transfiriendo el contenido de la posición direccionada por el CPU usualmente al acumulador, a través del bus de datos.

### **Operación de Escritura de Datos en Memoria**

Esta operación es muy similar a la lectura, excepto por la dirección del flujo de datos. El CPU transmite la dirección a la memoria, posteriormente los datos se envían desde el CPU y por último se emite la orden de escritura de datos.

### **Operación de Entrada /Salida**

En los microcontroladores, la operación entrada y salida son muy similares a las de lectura en memoria, excepto por el hecho de que lo que se direcciona es un puerto de entrada / salida en lugar de una posición de memoria. La instrucción se recibe de la memoria de

programa, se almacena y se ejecuta de la misma manera que una de lectura o escritura a memoria.

### 3.9 Memorias internas.

Este microcontrolador tiene tres tipos de memoria RAM, ROM y EEPROM.

La memoria de acceso aleatorio (RAM – Random Access Memory), contiene grandes cantidades de transistores. Existen diversos tipos de memoria de acceso aleatorio. La RAM estática RAM conserva la información mientras esté conectada la tensión de alimentación, y suele emplearse como memoria *cache* porque funciona a gran velocidad.

Existe otro tipo de memoria que es denominada de sólo lectura (ROM – Read Only Memory), este tipo de memoria es utilizada para ejecutar el inicio del programa principal del controlador, o también denominado sistema operativo de máquina, como su nombre lo indica no se puede mandar a escribir a este tipo de memoria, sino tan sólo leer, razón por lo cual al momento de programarla se debe de tener cuidado de que el programa es correcto, no es posible volver a reprogramar una memoria de este tipo.

Cuenta con 2 Kb de memoria eléctricamente borrrable (EEPROM - Electrically Erasable Programmable), este tipo de memoria como su nombre lo indica se puede borrar y escribir cuantas veces sea necesario.

### 3.10 Puertos de Entrada y Salida

Los *puertos de entrada* permiten al CPU la adquisición de datos de otros dispositivos externos o bancos exteriores de memoria. Los *puertos de salida* proveen al CPU de la capacidad de comunicar los resultados de sus cálculos o procesos lógicos a los periféricos

exteriores, estos puertos también pueden utilizarse para comunicar señales de control de proceso para dirigir a otros sistemas, tales como sistemas de instrumentación.

### Port A

En todos los modos de operación el puerto A puede estar configurado por 3 señales de entrada por captura (IC) y 5 señales de salida por comparación (OC), o para 4 OC y 4 IC.

El puerto A puede estar leyendo en cualquier momento.

**PA7:** es solo la entrada del acumulador de pulso, puede funcionar también como entrada/salida (I/O) de propósito general o como OC1 de salida.

**PA(6:4):** sirve como salida de propósito general, o timer de entrada o timer de captura de salida (2-4) respectivamente. Las terminales PA(6:2) pueden estar controladas por OC1.

**PA3:** puede estar en I/O o en IC/OC. Las funciones del timer incluyen OC1 y IC4/OC5. La terminal PA3 puede solo estar configurada para permitir que OC1 dispare a IC4.

**PA(2:0):** sirve como propósito general de entrada IC(1:3).

### Port B

Durante el modo de operación "single-chip", todas las terminales del puerto B están como salidas de propósito general. El puerto B puede ser solo usado en el modo single de

salida *strobed*, donde el pulso de salida apárese en el STRB, cada dato es escrito en el puerto B.

Durante cada ciclo del MCU, 15 bits a través de 8 líneas del bus de direcciones están como salidas en el PB(7:0).

### Port C

En el modo de operación "single-chip" todos las terminales del puerto C son de propósito general entrada/salida. Las entradas del puerto C pueden estar alternadas con el registro PORTC proporcionando una entrada a la señal STRA. El puerto C puede solo ser usado en el modo handshake paralelo I/O donde la entrada STRA y la salida STRB actúan como control de líneas en handshake.

Cuando el modo de operación expandido multiplexado todo el puerto C está configurado como multiplexor de señal dirección/datos.

### Port D

Las terminales PD(5:0) pueden ser usadas como señales de propósito general I/O. Estas terminales alternativamente sirven como una interfase serial de comunicación (SCI) e interfase serial periférica (SPI) cuando esos subsistemas están permitidos.

**PD0** sirve la entrada de datos (RxD) para el SCI

**PD1** transmite la salida de datos (TxD) para el SCI

**PD(5:2)** están dedicadas a la interfase serial periférica (SPI)

**PD2** es la señal maestro de entrada y esclavo de salida MISO (master in slave out)

**PD3** es la señal maestro de salida y esclavo de entrada MOSI (master out slave in)

**PD4** es la señal de reloj serial (SCK)

**PD5** es el selector del esclavo de entrada (SS)

### **Port E**

Se usa el puerto E para propósito general o para la entrada del convertidor A/D. Si se requiere una alta precisión para conversiones A/D, evite leer el puerto E durante el muestreo, ya que pequeños disturbios pueden reducir la exactitud de estos resultados.

### **3.11 Convertidor Analógico-Digital (A/D)**

El convertidor A/D del HC11 emplea la técnica de aproximaciones sucesivas para la conversión, pero con la peculiaridad de una redistribución de carga toda capacitiva, que hace innecesario tener un circuito de muestreo y retención a la entrada del convertidor.

El convertidor es de 8 canales de 8 bits con resolución de  $\pm \frac{1}{2}$  bit menos significativo (LSB- Least Significant Bit).

En la Figura 3.4 se muestra el circuito básico de redistribución de carga A/D.

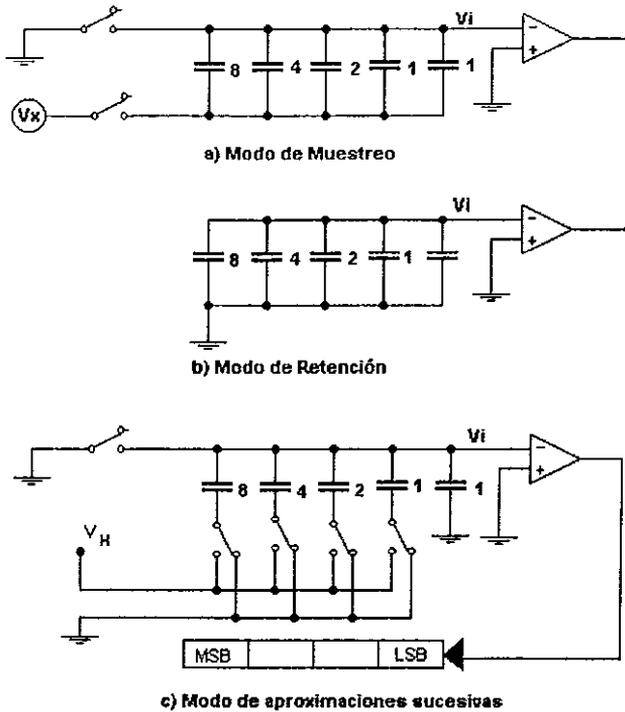


Figura 3.4 Circuito convertidor A/D básico

$V_x$  es el voltaje desconocido a convertir, el valor de los capacitores no es importante sino su relación, para los capacitores en el modo de muestreo ( $Q = CV$ ) la carga total es:

$$Q_s = 16 V_x$$

En el modo de retención, conmutadores permiten que donde se aplicaba  $V_x$  se tenga tierra y donde era tierra quede abierto; por la ley de conservación de carga:

$$V_i = - V_x$$

Que es el voltaje inicial de entrada al comparador.

En el proceso de aproximaciones sucesivas, se empieza por el capacitor más grande, que corresponde al bit más significativo (MSB More Significant Bit) del resultado digital, es conmutado de tierra a voltaje alto  $V_H$  como se muestra en la Figura 3.5, los voltajes  $V_i$  y  $V_H$  determinan como se carga ese capacitor y por lo tanto la salida del comparador, eso permite determinar si el bit MSB es alto o bajo. El proceso se repite para cada capacitor (cada bit) hasta terminar el proceso.

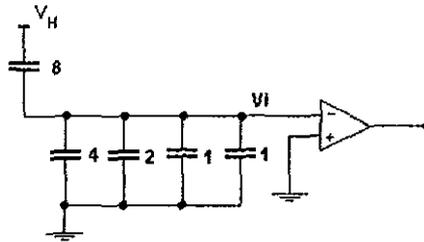


Figura 3.5 Circuito para probar MSB.

Las curvas de transferencia se muestran a continuación

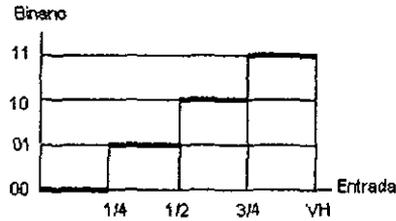


Figura 3.6 Función de transferencia para 4 bits.

Se observa que el error es de  $\pm 1$  LSB, este error se puede llevar  $\pm \frac{1}{2}$  LSB, lo cual se logra sumando un capacitor de  $\frac{1}{2}$  respecto al de referencia, que hace que la función de transferencia se recorra como en la Figura 3.7.

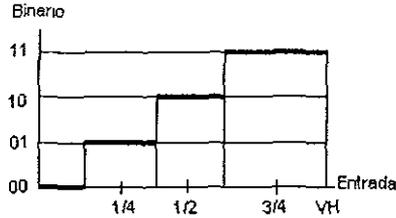


Figura 3.7 Función de transferencia con capacitor de  $\frac{1}{2}$ .

La Figura 3.8 muestra un convertidor A/D, con 8 bits, que tiene 2 arreglos de capacitores, cada uno de 4 bits y el capacitor de 1.1 en serie, que divide el valor de los capacitores de bajo orden entre 16, que permite una mejor igualación de los tamaños de los capacitores, también muestra el capacitor de  $\frac{1}{2}$ .

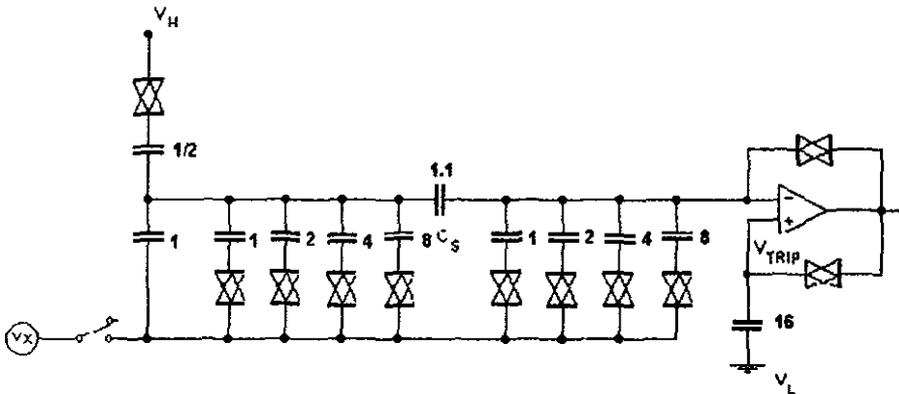


Figura 3.8 Convertidor analógico digital

### 3.12 Conjunto de Instrucciones

El MCU tiene un conjunto de 59 instrucciones básicas las cuales pueden dividirse en cinco tipos diferentes: registro/memoria, lectura-modificación-escritura, bifurcación, manipulación de bits y control.

#### 3.12.1 Instrucciones de Registro / Memoria

Muchas de estas operaciones usan dos operandos. Un operando puede residir en el acumulador o el registro índice. El otro operando se obtiene de memoria usando uno de los modos de direccionamiento. Las instrucciones de salto incondicional (JMP) y salto a subrutina (JSR) no tienen operando de registro. La Tabla 3.2 muestran algunas instrucciones de registro.

<b>Función</b>	<b>Mnemónico</b>
Carga A desde la memoria	LDA
Carga X desde la memoria	LDX
Almacena A en la memoria	STA
Almacena X en la memoria	STX
Suma la memoria al contenido de A	ADD
Suma la memoria y el acarreo al contenido de A	ADC
Resta a la memoria	SUB
Resta a la memoria desde A con préstamo	SBC
Realiza una AND de la memoria con A	AND
Realiza una OR de la memoria con A	ORA
Realiza una OR Exclusiva de la memoria con A	EOR
Comparación aritmética de A con la memoria	CMP
Comparación aritmética de X con la memoria	CPX
Bit de verificación de la memoria con A (comparación lógica)	BIT
Salto incondicional	JMP
Salto a subrutina	JSR

**Tabla 3.2 Instrucciones de registro y memoria**

### 3.12.2 Instrucciones lectura-modificación-escritura

Estas instrucciones leen una localidad de memoria o un registro, modifican o verifican estos contenidos y escriben el valor modificado en memoria o en un registro. Las instrucciones de verificación para no negativa o cero (TST) son una excepción de la lectura-modificación-escritura ya que no modifican el valor. La Tabla 3.3 muestra algunas instrucciones de lectura y escritura con su correspondiente mnemónico.

Función	Mnemónico
Incremento	INC
Decremento	DEC
Limpia	CLR
Complemento	COM
Negado (Segundo complemento)	NEG
Rotación a la izquierda con acarreo	ROL
Rotación a la derecha con acarreo	ROR
Corrimiento lógico a la izquierda	LSL
Corrimiento lógico a la derecha	LSR
Corrimiento lógico a la derecha	ASR
Verifica para negativo o cero	TST

Tabla 3.3 Instrucciones lectura-modificación-escritura.

### 3.12.3 Instrucciones de bifurcación

Este conjunto de instrucciones bifurca si se da una condición en particular, en otro caso la operación no se realiza. Las instrucciones de bifurcación son de 2 bytes.

Función	Mnemónico
Bifurca siempre	BRA
Nunca bifurca	BRN
Bifurca si es alto	BHI
Bifurca si es bajo o igual	BLS
Bifurca si el acarreo es limpio	BCC
Bifurca si el acarreo es alto o igual	(BHS)
Bifurca si el acarreo es uno	BCS
Bifurca si no es igual a cero	BNE
Bifurca si es igual a cero	BEQ
Bifurca si el acarreo medio está limpio	BHCC
Bifurca si el acarreo medio es alto	BHCS
Bifurca si es mayor	BLO
Bifurca si es menor	BMI
Bifurca si el bit de interrupción enmascarable es uno	BMC
Bifurca si el bit de interrupción enmascarable se coloca	BMS
Bifurca si la línea de interrupción es baja	BIL
Bifurca si la línea de interrupción es alta	BIH
Bifurca a subrutina	BSR

Tabla 3.4 Instrucciones de bifurcación.

### 3.12.4 Interrupciones de control

Estas interrupciones registran las instrucciones de referencia y se usan para controlar la operación del proceso durante la ejecución de un programa.

Función	Mnemónico
Transfiere A a X	TAX
Transfiere X a A	TXA
Coloca el bit de acarreo en uno	SEC
Limpia el bit de acarreo	CLC
Coloca el bit de interrupción enmascarada	SEI
Limpia el bit de interrupción enmascarada	CLI
Interrupción por Software	SWI
Retorno de subrutina	RTS
Retorno de interrupción	RTI
No opera	NOP

Tabla 3.5 Instrucciones de interrupciones de control.

### 3.12.5 Instrucciones de manipulación de bits

El MCU es capaz de colocar o limpiar cualquier bit que resida en los primeros 256 bytes del espacio de memoria, donde todos los registros de puerto, puertos DDR, timer, control del timer y de la RAM. Una característica adicional permite la verificación de software y bifurcación de un estado de cualquier bit en estas 256 localidades. Las funciones de limpiar bit y verificar bit y de bifurcación se implementan con una simple instrucción.

Función	Mnemónico
Bifurca si el bit $n$ es uno	BRSET $n$ ( $n=0..7$ )
Bifurca si el bit $n$ es cero	BRCLR $n$ ( $n=0..7$ )
Coloca el bit $n$ en 1	BSET $n$ ( $n=0..7$ )
Limpia el bit $n$	BCLR $n$ ( $n=0..7$ )

Tabla 3.6 Instrucciones de manipulación de bits.

### 3.13 Tecnologías futuras

La tecnología de los microprocesadores y de la fabricación de circuitos integrados está cambiando rápidamente. En la actualidad, los microprocesadores más complejos contienen unos 10 millones de transistores. Se prevé que en el 2000 los microprocesadores avanzados contengan más de 50 millones de transistores, y unos 800 millones en el 2010.

Las técnicas de litografía también tendrán que ser mejoradas. En el año 2000, el tamaño mínimo de los elementos de circuito será inferior a 0.2 micras. Con esas dimensiones, es probable que incluso la luz ultravioleta de baja longitud de onda no alcance la resolución necesaria. Otras posibilidades alternativas son el uso de haces muy estrechos de electrones e iones o la sustitución de la litografía óptica por litografía que emplee rayos X de longitud de

onda extremadamente corta. Mediante estas tecnologías, las velocidades de reloj podrían superar los 1,000 MHz en el 2010.

Se cree que el factor limitante en la potencia de los microprocesadores acabará siendo el comportamiento de los propios electrones al circular por los transistores. Cuando las dimensiones se hacen muy bajas, los efectos cuánticos debidos a la naturaleza ondulatoria de los electrones podrían dominar el comportamiento de los transistores y circuitos. Puede que sean necesarios nuevos dispositivos y diseños de circuitos a medida que los microprocesadores se aproximan a dimensiones atómicas. Para producir las generaciones futuras de microchips se necesitarán técnicas como la epitaxia por haz molecular, en la que los semiconductores se depositan átomo a átomo en una cámara de vacío ultraelevado, o la microscopía de barrido de efecto túnel, que permite ver e incluso desplazar átomos individuales con precisión.

## Conclusión

En el presente capítulo se estudio a detalle el microcontrolador utilizado (M68HC11), cabe hacer la aclaración de que trabajamos con un microcontrolador, y no con un microprocesador, la diferencia radica en que el microprocesador no se puede comunicar con otros dispositivos externos, es decir, no cuenta con puertos de entrada y salida para datos, punto fundamental y necesario para poder comunicarnos con los sensores de temperatura.

El microcontrolador es una herramienta fundamental en casi todos los proyectos, que antiguamente se desarrollaban únicamente con dispositivos analógicos, lo cual nos trae varias ventajas como son:

- ⌚ Mayor rapidez de respuesta del sistema.
- ⌚ Menor espacio físico.
- ⌚ Menos dispositivos externos.
- ⌚ Mayor exactitud de los cálculos.
- ⌚ Se pueden evitar ciertos transitorios a través de software.

También analizamos la arquitectura utilizada, la cual no es necesario que se desarrolle, tal cual se presenta en este capítulo, se pueden utilizar microcontroladores más sencillos y por tanto más económicos para la fabricación de este tipo de controladores, la razón por lo cual se utilizo el microcontrolador M68HC11 es por su facilidad para el desarrollo de programas en su etapa experimental, además de ser el mismo microcontrolador utilizado para programar en distintas materias de la facultad.

## Capítulo 4

### Etapa de potencia

---

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

Los conmutadores pueden realizar las funciones de rectificación, inversión y regulación del flujo de potencia.

#### 4.1 Elementos de potencia

Entre los elementos de potencia que permiten construir equipos de potencia son los convertidores estáticos (rectificadores, convertidores de corriente y de frecuencia). Se distinguen los siguientes:

- Elementos rectificadores no controlables (diodos).
- Elementos rectificadores controlables (tiristores, SCR, triacs).

##### 4.1.1. Diodos

El diodo es un elemento rectificador no controlable. Conduce la corriente en el sentido ánodo - cátodo, mientras que se bloquea en el sentido cátodo - ánodo. Con una característica ideal se puede suponer que la caída de tensión entre ánodo y cátodo en el sentido de la conducción es nula y que la corriente de diodo, en el sentido de bloqueo es nulo.



Figura 4.1 Diodo

#### 4.1.2. Tiristores

El tiristor es el elemento rectificador controlable más extendido como se muestra en la Figura 4.2. Conduce la corriente en el sentido ánodo - cátodo solamente si se le aplica un impulso de disparo en la puerta o gate. La dirección cátodo - ánodo está bloqueada siempre.

El disparo del tiristor se efectúa con la ayuda de un impulso positivo entre compuerta o gate y el cátodo, con la condición de que la tensión ánodo - cátodo sea positiva. El bloqueo de la corriente se produce en el paso por cero de ella misma, con la condición de que la tensión entre ánodo y cátodo sea negativa inmediatamente después del bloqueo del tiristor y durante cierto periodo de tiempo (10 a 200  $\mu$ s según el tipo de tiristor).

Cuando el tiristor es disparado y conduce corriente hay una caída de tensión de aproximadamente 1.5 V. Por esta razón estos dispositivos de potencia tienen una limitación térmica. Por lo cual debe estar protegido contra tensiones transitorias. Su conexión o puesta en conducción es sencilla, pero su desconexión o puesta en corte puede ser complicada.

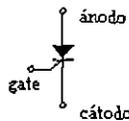


Figura 4.2 Tiristor

### 4.1.3. Rectificador Controlado de Silicio (SCR - Silicon Controlled Rectifier)

El diodo semiconductor de dos capas ha dado lugar a un dispositivo de cuatro capas pnpn, llamado SCR (rectificador controlado de silicio), este dispositivo con un mecanismo de control se llama tiristor.

El SCR se introduce por primera vez en 1956 en los Bell Telephone Laboratories. Las áreas comunes de su aplicación son en: los controles de relevadores, los circuitos de retraso de tiempo, las fuentes de alimentación reguladas, los interruptores estáticos, los controles de motores, muestreadores (choppers), inversores, cargadores de baterías, circuitos de calefacción y controles de fase..

Los SCR están diseñados para controlar potencias tan altas como 10 MW y valores nominales como 2000 A a 1800V. Su intervalo de frecuencia de aplicación se extiende a 50 kHz, permitiendo aplicaciones de alta frecuencia, tales como calentamiento por inducción y limpieza ultrasónica.

#### 4.1.3.1 Operación Básica

El SCR cuenta con una tercera terminal para propósito de control, esta terminal es llamada compuerta, determina cuándo el rectificador conmuta del estado de circuito abierto al de corto circuito. No es suficiente con polarizar directamente la región del ánodo al cátodo del dispositivo. En la región de conducción, la resistencia dinámica del SCR es por lo general de 0.01 a 0.1  $\Omega$ . La resistencia inversa es típicamente de 100 k $\Omega$  o más.

El símbolo gráfico del SCR es el mostrado en la Figura 4.3

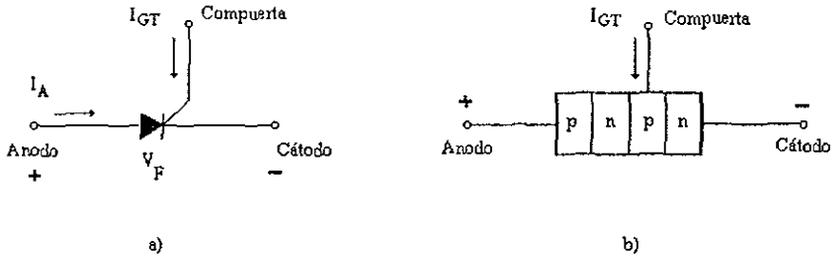


Figura 4.3 (a) Símbolo del SCR; (b) Construcción básica.

Al establecer una conducción directa, el ánodo debe ser positivo con respecto al cátodo. Sin embargo esto no es un criterio suficiente para activar el dispositivo. También debe aplicarse en la compuerta un pulso de magnitud suficiente para establecer una corriente de disparo, representada por  $I_{GT}$ .

El SCR permanece encendido incluso si la entrada de corriente es diferente (aunque la fuente sea desconectada). Esto es, el SCR funciona solo cuando es aplicada corriente en la entrada o gate y cuando se aplica voltaje al ánodo y cátodo.

Un análisis detallado del SCR se logra dividiendo la estructura *pnpn* en dos estructuras de transistor de tres capas como se muestra en la Figura 4.4

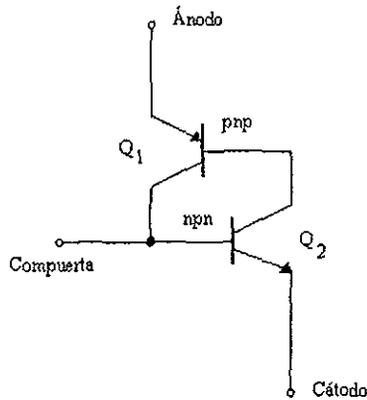


Figura 4.4 Circuito equivalente con dos transistores.

#### 4.1.3.2 Estado “de corte” del SCR

Para su análisis, se muestra una señal en la Figura 4.5, la cual es aplicada en la compuerta del SCR. Durante el intervalo;  $0 \rightarrow t_1$ ;  $V_{\text{compuerta}} = 0V$ , es equivalente a la terminal de la compuerta conectada a tierra. Para,  $V_{BE_2} = V_{\text{compuerta}} = 0V$ , la corriente de base  $I_{B_2} = 0$  e  $I_{C_1}$  será aproximadamente  $I_{C_0}$ . La corriente de base de,  $Q_1$ ,  $I_{B_1} = I_{C_2} = I_{C_0}$ , es demasiado pequeña para ser conducida a  $Q_1$ . Por lo que ambos transistores se encuentran en el estado de “corte”, lo que produce una impedancia elevada entre el colector y el emisor de cada uno de los transistores y la representación de un circuito abierto para el SCR es de la Figura 4.5 (c).

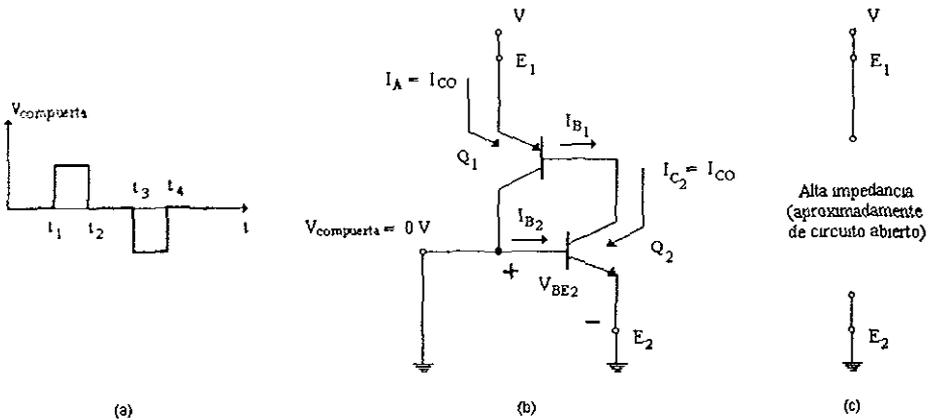


Figura 4.5 Estado “de corte” del SCR

### 4.1.3.3 Estado “de conducción” del SCR

En  $t = t_1$  un pulso de  $V_G$  volts aparecerá en la compuerta del SCR. El potencial  $V_G$  indicado en la Figura 4.6 (a) se elige lo bastante grande como para poner en conducción a  $Q_2$  ( $V_{be_2} = V_G$ ). La corriente de colector de  $Q_2$  aumentará a un valor grande para poner en conducción  $Q_1$  ( $I_{B_1} = I_{C_2}$ ). Cuando  $Q_1$  se encuentra en conducción,  $I_{C_1}$  aumentará, produciendo un incremento en  $I_{B_2}$ . El aumento en la corriente de base para  $Q_2$  da por resultado un incremento adicional en  $I_{C_1}$ . La resistencia resultante ánodo a cátodo

$$\left[ R_{SCR} = \frac{V}{(I_A - I_{C2})} \right]$$

es entonces es muy pequeña, lo que origina la representación en corto circuito para el SCR, como en la Figura 4.6 (b). Esta acción, produce que el SCR tenga tiempos de disparo típicos

de 0.1 a 1  $\mu$ s. Sin embargo, los dispositivos de alta potencia en el intervalo de 100 a 400 A pueden tener tiempos de disparo de 10 a 25  $\mu$ s.

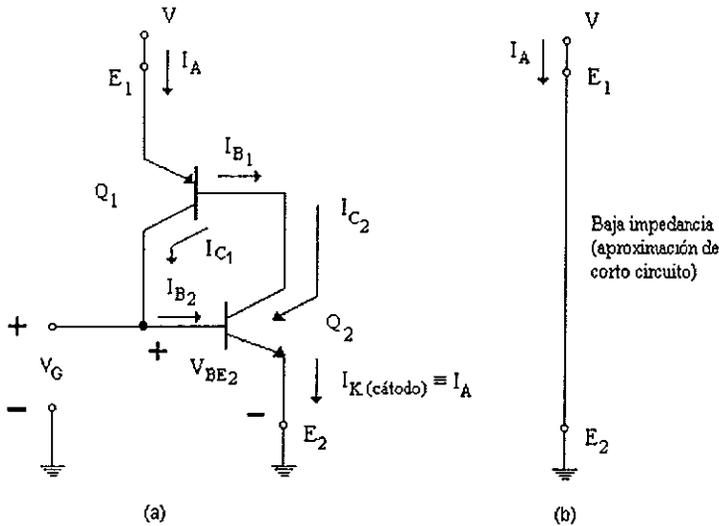


Figura 4.6 Estado "de conducción" del SCR

Los SCR también pueden activarse mediante un aumento significativo de la temperatura del dispositivo o incrementando el voltaje del ánodo a cátodo hasta el valor de ruptura.

Un SCR no puede apagarse con sólo suprimir la señal de la compuerta, y sólo algunos pueden desactivarse aplicando un pulso negativo en la terminal de la compuerta  $t = t_j$ .

#### 4.1.3.4 Métodos para desactivar un SCR

Existen dos métodos generales para desactivar un SCR, *interrupción de la corriente al ánodo y las técnicas de conmutación forzada*.

☞ Interrupción de la corriente al ánodo

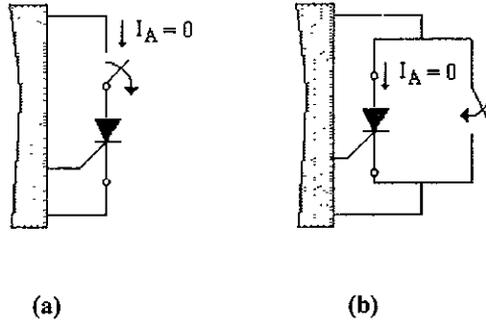


Figura 4.7 Interrupción de la corriente del ánodo

La  $I_A$  es cero cuando el interruptor está abierto (*interrupción en serie*) (a), en tanto para la figura (b) se establece la misma condición cuando el interruptor está cerrado (*interrupción en derivación*)

☞ Técnica de conmutación forzada

La conmutación forzada corresponde a “forzar” la corriente a través del SCR en la dirección opuesta a la conducción directa. Un tipo de circuito para realizar esta función es el de la Figura 4.8 (a); donde el circuito de apagado consiste en un transistor *npn*, una batería de cd,  $V_B$  y un generador de pulsos.

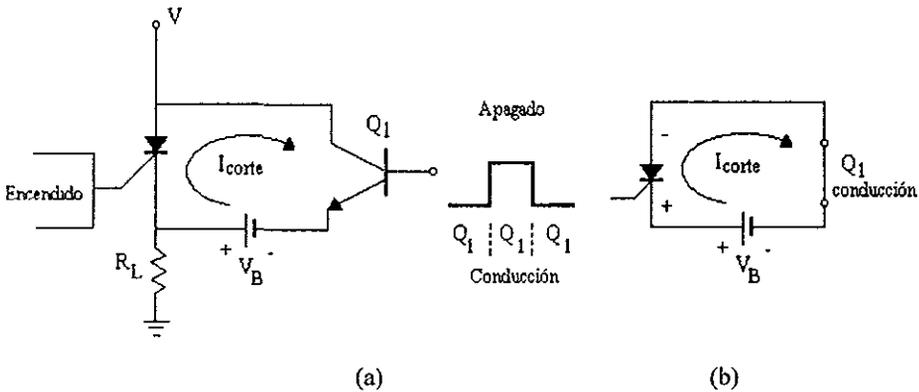


Figura 4.8 Técnica de conmutación forzada

Durante la conducción del SCR el transistor se encuentra en estado de corte; esto es,  $I_B = 0$  y la impedancia de colector a emisor es sumamente alta (para todos los propósitos un circuito abierto). Esta alta impedancia evitará que el circuito de apagado afecte la operación del SCR. Para las condiciones de apagado se aplica un pulso positivo en la base del transistor, poniéndolo en conducción, con lo que se produce una muy baja impedancia del colector al emisor (representación en corto circuito). El potencial de la batería aparecerá directamente en el SCR como en la Figura 4.8 (b), forzando la corriente a través de él en la dirección inversa para el apagado. Los tiempos de apagado de los SCR son por lo general de 5 a 30  $\mu$ s.

#### 4.1.3.5 Características y valores nominales del SCR

Las características de un SCR se observan en la Figura 4.9 para diversos valores en la corriente de compuerta.

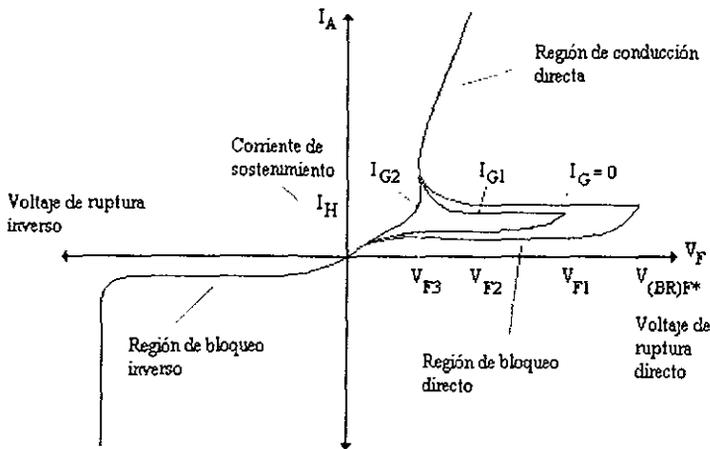


Figura 4.9 Características del SCR

Los voltajes y corrientes de interés se indican a continuación:

1. **Voltaje de ruptura directa**  $V_{(BR)F*}$  es el voltaje arriba del cual el SCR entra en la región de conducción. El asterisco (\*) corresponde a una letra que se añadirá y depende de la condición de la terminal de la compuerta de la siguiente manera:

O = circuito abierto de G a K

S = corto circuito de G a K

R = resistor de G a A

V = polarización (voltaje) fija de G a K

2. *Corriente de sostenimiento  $I_H$*  es el valor de la corriente por debajo del cual el SCR conmuta del estado de conducción al de la región de bloqueo directa, en condiciones establecidas.
3. *Regiones de bloque directa e inversa* son aquellas que corresponden a la condición de circuito abierto para el rectificador controlado que bloquea el flujo de carga (corriente) del ánodo al cátodo.
4. *Voltaje de ruptura inverso* es equivalente a la región Zener o de avalancha del diodo semiconductor fundamental de dos capas.

Para la característica que tiene la línea sólida de la gráfica ( $I_G = 0$ ),  $V_F$  debe alcanzar el más alto valor del voltaje de ruptura requerido ( $V_{(BR)F^*}$ ) antes de que ocurra el afecto de colapso y el SCR pueda entrar en la región de conducción correspondiente al estado de conducción. Si la corriente de compuerta se incrementa a  $I_{G1}$  aplicando un voltaje de polarización en la terminal de la compuerta, el valor de  $V_F$  que se requiere para la conducción ( $V_{F1}$ ) es considerablemente menor.  $I_H$  descendiendo con el aumento de  $I_G$  si se incrementa a  $I_{G2}$  se disparará a valores muy bajos de voltaje ( $V_{F3}$ ) y las características empiezan a aproximarse a la del diodo básico de unión p-n. Considerando las características para un voltaje particular  $V_1$ , digamos  $V_{F2}$ , si la corriente de compuerta se incrementa a  $I_G = 0$  a  $I_{G1}$  o más, el SCR se disparará.

#### 4.1.4. Triac

El triac (triode alternating current switch) Figura 4.10 es una combinación inversa en paralelo de dos terminales de capas semiconductoras, con una compuerta para controlar las

condiciones de disparo del dispositivo bilateral en cualquier dirección. Esto es en cualquier dirección la corriente de compuerta puede controlar la acción del dispositivo.

La ventaja principal que presenta en comparación con el montaje antiparalelo de dos tiristores es el hecho de que solo existe una puesta o gate.

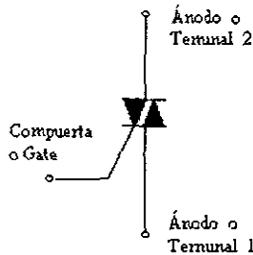


Figura 4.10 Triac

El triac es un tiristor que puede adoptar el estado de conducción para ambos sentidos de corriente, y para que pase del régimen de bloqueo al régimen de conducción, es suficiente aplicar a la compuerta un impulso de cualquier polaridad. El triac se bloquea en el paso por cero de la corriente.

El triac se puede considerar como un contacto de corriente alterna de pequeñas dimensiones. A menudo se le emplea en combinación con el diac, así un triac y un diac conectados adecuadamente pueden servir para ajustar la luminosidad de una lámpara de corriente alterna, dispositivo conocido como dimmer, el cual es una parte del propósito de esta tesis.

#### 4.1.4.1 Características de salida del triac

En la Figura 4.11 se muestran las características de salida para un triac.

En el triac, las características de salida reflejan el comportamiento de la tensión entre las terminales 1 y 2 en relación con la corriente que recorre al tramo entre terminal 1 y 2. Aparece también la corriente de compuerta debido a la influencia que tiene sobre las

características de bloqueo, a cada valor de la corriente de la compuerta corresponde un par de líneas características de bloqueo.

La diferencia entre un triac y un tiristor, es que en el caso del triac no hay ningún sentido de bloque inverso y el sentido de conducción se presenta para ambos sentidos de la corriente. La corriente y tensión del tramo de la compuerta, puede tener el mismo signo para los dos sentidos de la corriente.

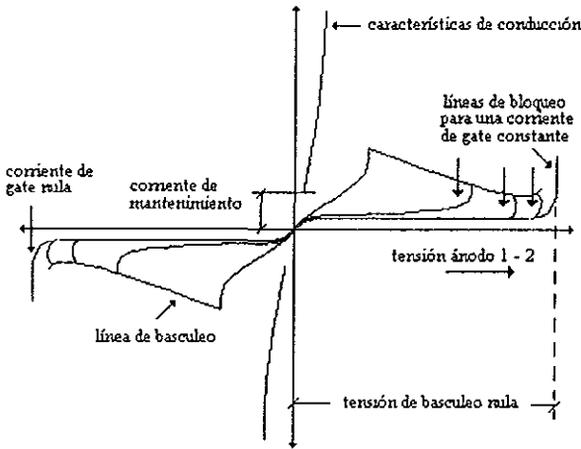


Figura 4.11 Características de salida de un triac.

El eje vertical es la tensión entre terminales 1 y 2 que se designa por  $U_{A2A1}$ . El eje horizontal, la tensión entre compuerta y la terminal 1  $U_{StA1}$  es decir, es la tensión en el tramo de la compuerta.

Cuadrante	Tensión $U_{StA1}$	Tensión $U_{A1A2}$
I	positiva	positiva
II	negativa	positiva
III	negativa	negativa
IV	positiva	negativa

Tabla 4.1

Para representar la dependencia entre las tensiones del tramo principal y del gate, se necesitan 4 cuadrantes, si se quiere tomar en consideración las polaridades de dichas tensiones, Tabla 4.1.

Se arranca donde con el signo cambiante de la tensión  $U_{A1 A2}$ , se obtiene una tensión  $U_{S1 A1}$  también de signo alternativo (cuadrante I y II).

En el caso de tener que emplear impulsos de una sola polaridad para el arranque, se emplean impulsos negativos de la tensión  $U_{S1 A1}$  y se trabajará en los cuadrantes II y III.

La Figura 4.12 muestra como el arranque o paso de la corriente puede desencadenarse tanto si la tensión gate-terminal 1 es positiva como negativa.

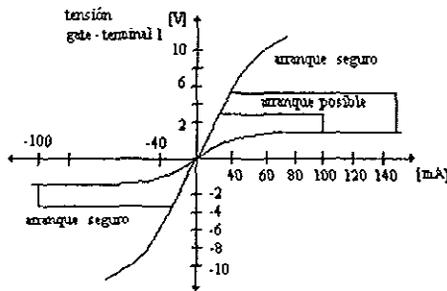


Figura 4.12 Características de entrada de un triac. Para el arranque con tensiones positivas en el gate con respecto a la terminal 1

El funcionamiento con tensiones negativas de gate-terminal 1 y corriente de gate también negativas ofrecen la ventaja de tener un solo y definido margen de arranque seguro. Para valores positivos de la tensión gate-terminal 1 y de la corriente de gate, se obtienen dos márgenes. El margen pequeño hace referencia al arranque con una tensión positiva de la terminal 2 respecto de la 1. El margen mayor corresponde al caso en que la tensión de la terminal 1 sea positiva respecto de la 2.

Por lo que resulta conveniente trabajar con impulsos de arranque negativos respecto a la terminal. Con lo cual resulta suficiente tensión del orden de 3 V para el tramo gate-terminal 1 y corriente de gate de por lo menos 100 mA.

#### 4.1.4.2 Triac como interruptor de corriente alterna

Es realizable en el supuesto de tratarse de tensiones alternas de no muy elevada frecuencia.

Al alimentar un circuito con tensión alterna de la red, el valor instantáneo de esta tensión pasa por cero dos veces en cada periodo. La corriente alterna pasa por cero a intervalos iguales (esto es cada semiperiodo).

La Figura 4.13 consta de un triac, una resistencia de protección (para limitar la corriente de gate).

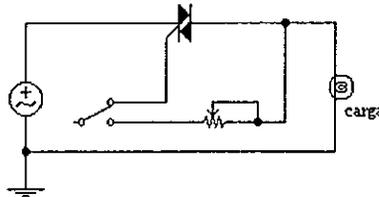


Figura 4.13 Triac empleado como interruptor.

Estando el contacto abierto, queda bloqueado el paso de corriente a través del triac para las dos polaridades de la corriente alterna. Al cerrar el contacto, y mientras el triac está todavía bloqueado, aparece prácticamente la plena tensión de la red a la conexión en serie de la resistencia de protección y el contacto de operación.

En el momento en que el valor instantáneo de la tensión alcance el valor de la tensión de arranque, circulará una corriente en el gate que provocará la conducción del triac.

La corriente se desconecta en el momento en que alcance su valor de mantenimiento, y vuelve a aparecer un corto tiempo después de iniciado un nuevo semiperiodo, siempre y cuando siga conectado el contacto de operación.

#### 4.1.4.3 Adecuada velocidad de crecimiento

La velocidad de crecimiento de la tensión en el triac puede reducir conectando un condensador en serie con una resistencia y ambos en paralelo con el triac, como lo muestra la Figura 4.14.

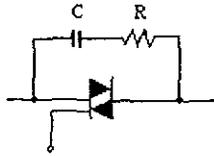


Figura 4.14 Puente con triac

La tensión podrá crecer solamente a la velocidad que permita la relación de la conexión serie de RC con respecto al valor total de las resistencias previas. La resistencia atenúa y elimina las oscilaciones, ya que podrían aparecer por la acción conjunta del condensador y la inductancia del circuito.

Para reducir la velocidad de crecimiento de la tensión basta modificar los componentes del miembro RC con los siguientes valores, variando los valores de R y C.

#### 4.1.4.4 Circuito de triac para dimmer

##### Dimmer

El dimmer es un circuito de mando para regular la intensidad de iluminación de una instalación de alumbramiento; esta regulación se efectúa por variación del ángulo de conducción.

En los dimmers, el arranque del paso de corriente se realiza mediante un impulso procedente de la descarga de un condensador.

Los triacs utilizados en los dimmers, actualmente se arrancan principalmente con impulsos muy definidos, que proporcionan los diacs.

Los circuitos que están previstos con dimmers son principalmente para lámparas incandescentes. Cuando se trata de operar con lámparas, se tiene que tomar precauciones propias de las cargas inductivas, al objeto de paliar los efectos de las sobretensiones y saltos de tensión que producen en el triac. Para ello se conecta entre la terminal 1 y 2 del triac un condensador en serie con una resistencia ( $100 \text{ nf} \dots 1 \mu\text{f}$ ;  $50 \dots 100 \Omega$ ). El condensador debe poder soportar una tensión alterna con un valor pico de por lo menos  $350 \text{ V}$ .

Los triacs pueden ocasionar perturbaciones radiofónicas, incluso en el caso de que operen sobre circuitos puramente óhmicos. A objeto de evitarlas, se emplea una conexión antiparasitaria constituida por un condensador y una inductancia (por ejemplo  $C_3$  y  $L$  del circuito de la Figura 4.15).

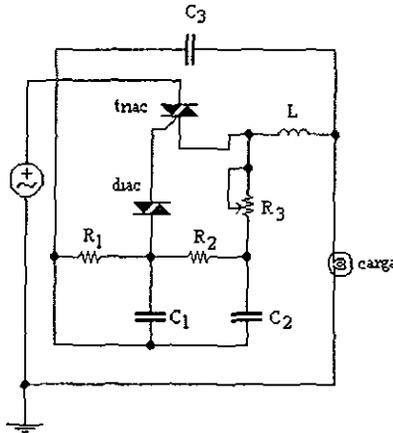


Figura 4.15 Circuito dimmer con triac y con conexión de doble constante de tiempo para aminorar el efecto de histéresis.

Para el uso de lámparas incandescentes hay que tener presente que su resistividad es aproximadamente de 5 a 15 veces menor en frío que en caliente (servicio) y que al “fundirse” su filamento puede ocasionar la aparición de un arco en el interior de la ampolla. Por ello es conveniente al seleccionar un tipo de triac, tener en cuenta que pueden existir sobrecorrientes. Estos valores picos, los podemos encontrar en las hojas de especificaciones del triac a escoger.

#### 4.1.4.5 Principio de gobierno del triac

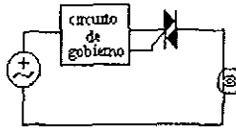


Figura 4.16 Circuito de mando y Triac.

Para el gobierno por ángulo de conducción ha de poderse ajustar el retardo con que se alcanza la tensión que da origen al impulso de descarga del condensador. Esto se logra cuando el condensador se carga a través de una resistencia variable, a cada semiperiodo de la tensión alterna de red.

Cuando mayor sea el valor de la resistencia ajustada, tanto mayor será el tiempo que transcurra entre el comienzo de cada semiperiodo y el instante en que se alcanza la tensión de conducción del diac, y en consecuencia, el momento en que la corriente de descarga del condensador ocasione el arranque del triac. Por el mismo motivo, el ángulo de conducción y el valor eficaz de la corriente del triac, resultarán correspondientemente menores. Figura 4.17.

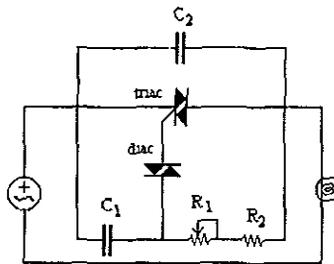


Figura 4.17 Circuito dimmer.

Algunos de los Triacs más utilizados en la industria de la electrónica son los mostrados a continuación Tabla 4.2

Serie	Voltaje pico de bloqueo	Corriente de sentido directo RMS	Corriente disparo de la compuerta	Voltaje de disparo de la compuerta	Corriente de onda en 60 HZ	Potencia	Potencia media en la compuerta
	$V_{DRM}$ [ V ]	$I_{T(RMS)}$ [ Amp ]	$I_{GT}$ [ mA ]	$V_{GT}$ [ V ]	$I_{TSM}$ [ Amp ]	$P_{GM}$ [ KW ]	$P_{G(AV)}$ [ Wats ]
LCG5635	400	10	50	2.5	100	4	0.5
ECG5645	600	10	50	2.5	120	6	0.5
LCG5606	400	15	40	2.5	150	6	0.5
ECG56019	200	25	50	2.5	200	3	0.5
LCG5689	400	40	50	2.5	300	16	0.5
TIC236	100 a	12	50		100	1.2 a 12.8	
TIC246	800	16	50		125		
TIC253	100 a	20	50		150	2 a 20	
TIC263	800	25	50		175		
MAC12D	400	12	50	1.5	120	4.8	
MAC12M	600					7.2	
MAC12N	800					9.6	
MAC16D	400	15	50	1.5	150	6	
MAC16M	600	15	50	1.5		9	
MAC16N	800	15	50	1.5		12	
MAC320A4	200	20	50	2.0	150	4	
MAC320A6	400	20	50	2.0		8	
MAC320A8	600	20	50	2.0		12	
MAC320A10	800	20	50	2.0		16	
MAC223A4	200	25	50	2.0	250	5	
MAC223A6	400					10	
MAC223A8	600					15	
MAC223A10	800					20	
MAC224A4	200	40	50	2.0	350	8	
MAC224A6	400					16	
MAC224A8	600					32	
MAC224A10	800					32	

Tabla 4.2 Triacs

El triac utilizado en el prototipo es el Q4006, donde el equivalente en la tabla anterior es el MAC218, y su funcionamiento se explicará a detalle en el capítulo siguiente.

#### 4.1.4.6 Varias lámparas incandescentes conectadas al mismo dimmer

Un mismo dimmer y carga previa sirven para gobernar varias lámparas, conectadas en paralelo. Para un correcto funcionamiento es preciso saber:

- Las lámparas presentan el mismo comportamiento. En consecuencia se seleccionarán de forma que sean del mismo tipo, fabricante, potencia y que lleven el mismo tiempo funcionando.
- El tiempo de precalentado necesario para un funcionamiento adecuado es del orden de unas horas. La Figura 4.18 muestra un circuito en el que varias lámparas están gobernadas por un mismo dimmer.

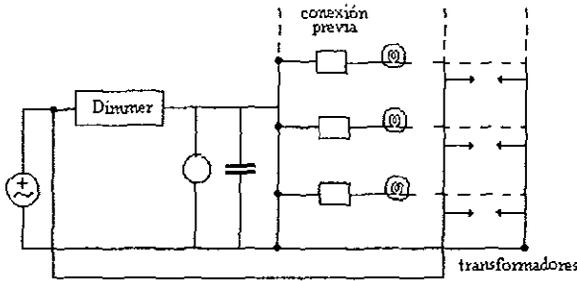


Figura 4.18 Dimmer para el control de varias lámparas incandescentes con compensación de corriente reactiva.

En el desarrollo de este trabajo, es indispensable la regulación de la intensidad luminosa, de las lámparas incandescentes en los paneles dentro del horno; esta regulación se lleva acabo mediante dimmers como el mostrado en la Figura 4.18. Uno de los propósitos de esta tesis es desarrollar un sistema, el cual regule la intensidad luminosa de forma automática, por medio de un mando basado en un microcontrolador que se encarga del ángulo de disparo del triac, a diferencia del circuito mostrado basado en componentes pasivos y un control manual, el cual puede ser susceptible a un mayor número de errores y cuyo ajuste es manual.

Este circuito forma parte de un sistema de control que se muestra en el siguiente capítulo, en el cual se explicarán a detalle los componentes que lo integran y su funcionamiento.

## 4.2 Protección contra sobrecorrientes

### Causa de las sobrecorrientes

Los elementos rectificadores son muy sensibles a las sobrecorrientes. Las pérdidas debidas a corrientes muy fuertes provocan un calentamiento muy elevado de la unión y causan la destrucción del elemento rectificador.

Las sobrecorrientes pueden estar provocadas por cortocircuitos en los bornes del convertidor estático o en una de sus ramas, o por sobrecargas debidas a la carga en la salida del convertidor estático.

Los elementos rectificadores soportan las intensidades solamente durante un periodo determinado de tiempo que es función de la misma sobreintensidad. Esta relación puede reducirse con la ayuda de la resistencia térmica transitoria.

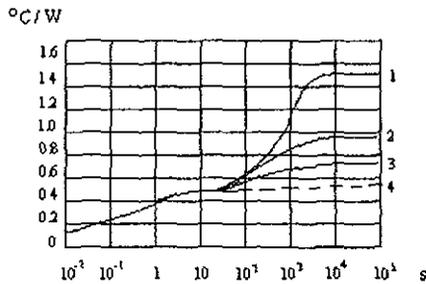


Figura 4.19 Resistencia térmica transitoria

1. Convección natural
2. Ventilación forzada  $v = 1$  m/s
3. Ventilación forzada  $v = 3$  m/s
4. Ventilación forzada  $v = \infty$

La Figura 4.19 muestra las características límite de sobrecarga de un elemento rectificador. Esta indica la corriente límite referida a la corriente nominal  $I_{Fn}$  en función del tiempo  $t$  admisible.

La protección debe cortar la corriente antes de que ésta alcance el valor límite. Con este objeto existen dos posibilidades: protección por fusible o por disyuntor rápido (o generalmente se combinan estos dos métodos).

#### 4.2.1 Protección por fusible y disyuntor rápido

El fusible sólo protege el elemento rectificador contra corrientes elevadas y asegura un corte rápido. El disyuntor interviene para sobrecorrientes medias con un tiempo de abertura cercano a 0.05 s con la ayuda de un disparador magnético. Las sobrecargas de una corriente entre  $1.3 \times I_{Fn}$  son controladas por el disparador térmico, ( $I_{Fn}$  corriente nominal).

Los fusibles se montan directamente en serie con el elemento rectificador, mientras que el disyuntor rápido se sitúa en el circuito de la carga del convertidor estático.

El corte de una corriente provoca siempre sobretensiones. La protección por fusible y disyuntor rápido debe ser lo suficientemente rápida para proteger los elementos rectificadores contra las sobrecorrientes.

#### ↻ Fusibles

En estos circuitos se precisan fusibles extrarápidos, ya que los normales no ofrecen protección para los triacs a causa de su inercia excesiva.

Un fusible es así un tramo de alambre delgado o de banda metálica delgada diseñado para calentarse y fundirse si se rebasa su capacidad máxima de corriente. Se coloca en serie con el circuito que se desea proteger. Los fusibles se deben instalar en el lado vivo porque si se conectan en el lado de voltaje bajo de la línea, el circuito electrificado permanecería en el potencial del conductor vivo, aún cuando se quemara el fusible. Al fundirse cuando la corriente que pasa por el circuito es mayor que su capacidad, el fusible destruye una parte del

trayecto conductor. Esto suspende la corriente en el resto del circuito. Generalmente esta interrupción debe suceder en la parte ascendente del primer ciclo de la corriente de falla para evitar daños.

La energía total que deja pasar el fusible es una función de  $I^2t$  siendo  $I$  la corriente pico que pasa y  $t$  el tiempo total de interrupción. Los fusibles limitadores de corriente deben tener las características de operación para  $I^2t$ . Para estas aplicaciones se emplean los llamados *fusibles rápidos*.

La fusión de un fusible indica que hay una función anómala dentro del circuito al que está protegiendo. Antes de cambiar un fusible fundido por uno nuevo, se debe localizar y reparar la causa.

#### ⚡ Disyuntor o interruptor termomagnético

Es un elemento de protección que también abre un circuito si se le aplica una sobrecarga. Sin embargo, a diferencia del fusible, el disyuntor no se destruye por la sobrecarga a menos que se rebase la capacidad nominal de interrupción de corriente.

Los disyuntores consisten por lo general en un interruptor que se mantiene cerrado mediante una traba. Para abrir el circuito la traba debe levantarse. Dos mecanismos comunes para destrabar el interruptor son el electroimán y la banda bimetálica. Cuando la corriente rebasa el valor crítico en la bobina electromagnética, su campo magnético jala la barra metálica y suelta la traba del interruptor termomagnético o disyuntor. En el tipo de mecanismo con banda bimetálica, la corriente que pasa a través del interruptor calienta la banda y hace que se doble. Si la banda se calienta debido a una corriente demasiado grande, se dobla hacia atrás tanto, que hace que salte la traba y se abre el contacto. Cuando la causa del exceso de corriente se ha localizado y reparado, se puede restablecer el interruptor termomagnético a su posición conductora mediante un interruptor o botonera.

## 4.2.2 Protección contra sobretensiones

### Causa de las sobretensiones

Los elementos rectificadores son sensibles a las sobretensiones que aparecen durante la duración del bloqueo entre ánodo y cátodo.

Existen dos fuentes de sobretensiones:

- ✓ Sobretensiones internas debidas al efecto de acumulación de portadores de carga en el elemento rectificador.
- ✓ Sobretensiones externas debidas a fenómenos atmosféricos o de corte, en la desconexión de transformadores en vacío.

Para la protección de los elementos rectificadores contra las sobretensiones, se utilizan en general circuitos *RC*.

### 4.2.2.1 Protección contra las sobretensiones internas mediante circuito *RC*

Mediante un circuito *RC* en paralelo con el elemento rectificador se puede disminuir sensiblemente la sobretensión en bornes del elemento rectificador. En este caso no hay ningún peligro para el elemento rectificador. Este circuito en paralelo permite al mismo tiempo limitar el crecimiento de la tensión  $dv/dt$  en los bornes del elemento rectificador.

### 4.2.2.2 Protección contra las sobretensiones externas mediante circuito *RC*

Para la protección contra sobretensiones externas, provenientes de la red de alimentación, es necesario prever un circuito *RC* entre cada fase y tierra. La capacidad del circuito *RC* se escoge de tal manera que la frecuencia de resonancia del circuito oscilante formado por *L* y *C* sea alrededor de 1000 Hz.

### 4.2.2.3 Protección contra las sobretensiones mediante semiconductores

Con los semiconductores es posible proteger los elementos rectificadores contra tensiones internas o externas. Estos semiconductores de óxido metálico son denominados varistores o supresores, los cuales se conectan en paralelo con el elemento rectificador.

### 4.3 Variadores de corriente alterna

Los variadores de corriente alterna deben conducir una corriente que circule en los dos sentidos. Por lo que es necesario utilizar un triac.

El variador de corriente monofásico se utiliza para variar la luminosidad de lámparas de iluminación en un campo de potencia desde unos cuantos watts hasta 10 kW aproximadamente.

La Figura 4.20 representa el circuito de un variador de corriente monofásico. Un triac alimentan una carga, que generalmente es resistiva, compuesta por una bobina y una resistencia  $L$  es la inductancia total y  $R$  la resistencia total de la carga.

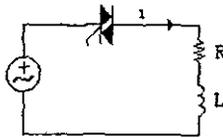


Figura 4.20 Circuito de un variador de corriente monofásico.

Se describe el funcionamiento de este circuito para cargas resistivas, inductivas y resistivas e inductivas.

## Conclusión

En este capítulo se describieron diferentes elementos de potencia en este caso rectificadores controlables como el tiristor, SCR y triac; de los cuales se nombran características y curvas de calibración.

En este trabajo es importante seleccionar un elemento rectificador de potencia, el cual nos permita controlar la intensidad luminosa de las lámparas incandescentes en los paneles dentro del horno. El elemento rectificador seleccionado es el triac, ya que tiene la ventaja de que en cualquier dirección la corriente de compuerta puede controlar la acción de disparo del dispositivo, esto es que, puede adoptar el estado de conducción para ambos sentidos de corriente, y para pasar del régimen de bloqueo al de conducción, es suficiente aplicar a la compuerta un impulso de cualquier polaridad.

El control del ángulo de disparo de disparo del triac se lleva a cabo por medio del microcontrolador, proceso que se desarrolla en los siguientes capítulos

## Capítulo 5

### Diseño del circuito

#### 5.1 Teclado

El teclado se basa en un arreglo matricial como el que se muestra en la Figura 5.1, donde se utiliza el puerto C del microcontrolador para poder manipularlo, se programa de tal forma que la parte baja del puerto (C0 a C3) sea la salida donde se escribe un barrido de un uno consecutivamente, el cual nos ayudará posteriormente a determinar la tecla que fue oprimida. La parte alta del puerto (C4 a C7) se programa como entrada, donde al presionar cualquier tecla se tendrá un uno, que dependiendo de la tecla oprimida formará una coordenada con el valor de salida del puerto C, cabe mencionar que con un solo puerto se pueden tener arreglos de 4 x 4 lo que da un total de 16 combinaciones, como para el propósito de esta tesis sólo requerimos de 12 combinaciones el bit C7 se manda a tierra para evitar estados erróneos.

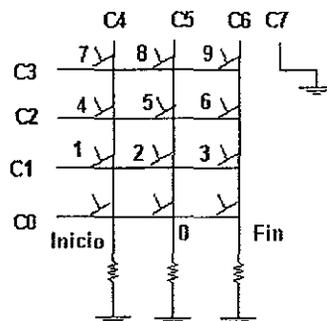


Figura 5.1 Arreglo matricial del teclado.

Como sólo se debe presionar una tecla a la vez no existe la posibilidad de estados distintos a los mostrados en la Tabla 5.1 la cual se obtuvo a partir de las coordenadas de unión al presionar una tecla, tomemos por ejemplo, el caso de la tecla 5 la cual se detectará cuando en C2 exista un uno, el cual al presionar dicha tecla lo transmitirá al bit C5 teniendo el siguiente resultado:

C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
0	0	1	0	0	1	0	0
2				4			

Además suponiendo que el usuario presione dos teclas a la vez, o por alguna otra circunstancia, se lea otro valor distinto a los mostrados en Tabla 5.1 el programa deberá responder como si no se hubiese oprimido ninguna tecla.

TECLA	HEXADECIMAL	VALOR DECIMAL	
INICIO	11	0001	0001
0	21	0010	0001
FIN	41	0100	0001
1	12	0001	0010
2	22	0010	0010
3	42	0100	0010
4	14	0001	0100
5	24	0010	0100
6	44	0100	0100
7	18	0001	1000
8	28	0010	1000
9	48	0100	1000

Tabla 5.1 Combinaciones del teclado.

## 5.2 Sincronización con la red eléctrica.

Debido a que el sistema trabaja con cargas puramente resistivas se puede utilizar un sistema de red eléctrica monofásico, o en su defecto si la carga es excesivamente grande se pueden implementar tres circuitos como el mostrado en la Figura 5.2, el cual se conecta a la red y obtiene a la salida una señal cuadrada con una frecuencia de 60 Hz y un retraso de  $180^\circ$  con respecto a la red, como se muestra en el oscilograma de la Figura 5.3.

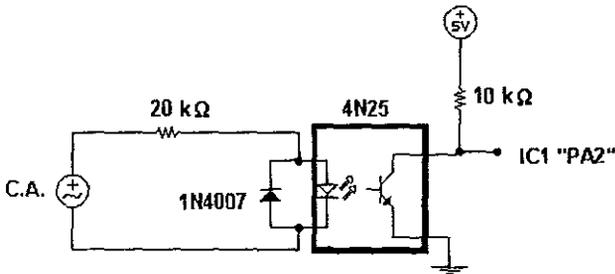


Figura 5.2 Obtención de la señal de sincronización.

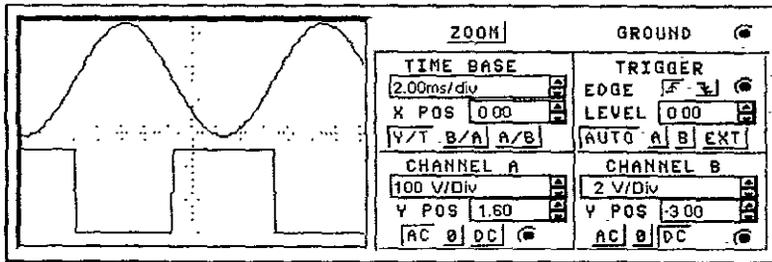


Figura 5.3 Oscilograma de la red eléctrica y de IC1.

El funcionamiento del circuito de la Figura 5.2 es el siguiente, cuando ocurre el semiciclo positivo de la red eléctrica el LED (Light Emission Diode) contenido en el integrado 4N25 se enciende, excitando la base del optotransistor contenido en el mismo integrado, saturándolo y haciendo que se comporte como un circuito cerrado en su interior, transmitiendo de esta forma un voltaje de cero volts o tierra a la terminal IC1.

Durante el semiciclo negativo el LED es polarizado en inversa por tanto no encenderá, evitando que se excite la base del optotransistor y manteniéndolo en corte, lo que significa que se comportará en su interior como un circuito abierto y el voltaje de 5 Volts se transmitirá a la terminal IC1, formando así la onda cuadrada completa, durante este tiempo se polarizará el diodo conectado en inversa con el LED para proteger al integrado del voltaje en inversa aplicado a él.

La resistencia de 20 k $\Omega$  se utiliza para limitar corriente y quedarse con el voltaje no utilizado en la polarización de los diodos, la resistencia de 10 k $\Omega$  no tiene funcionamiento cuando el optotransistor esta en corte, pero evita un circuito corto cuando se encuentra en saturación.

Este circuito puede ser utilizado tanto para el horno, como para el prototipo empleado en las pruebas, ya que permite una entrada de C.A. de 2.5 kV como máximo<sup>3</sup>.

### 5.3 Etapa de potencia

La etapa de potencia se basa en el circuito de la Figura 5.4, en la que se mandan pulsos de disparo por la salida por comparación OC3 del microcontrolador, los cuales encienden el LED contenido en el integrado MOC3020 permitiendo que el TRIAC contenido en el mismo integrado conduzca y disparar a su vez el TRIAC externo, controlando de esta forma el ángulo de disparo.

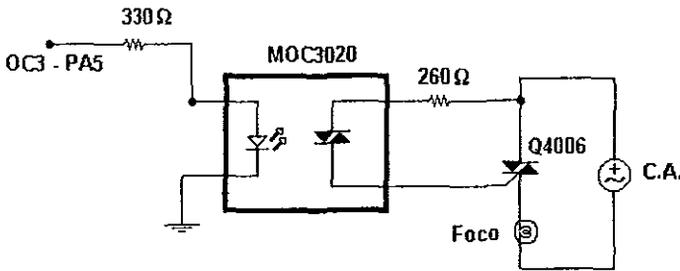


Figura 5.4 Etapa de potencia.

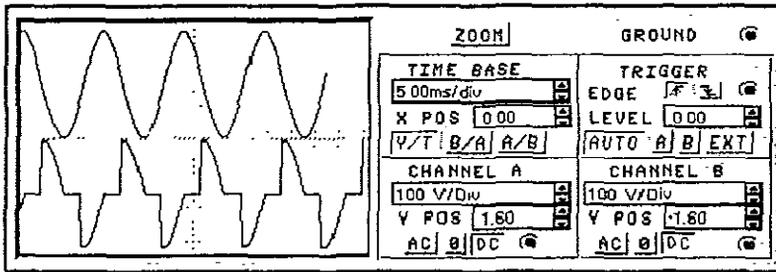


Figura 5.5 Oscilograma de la etapa de potencia.

En la Figura 5.5 se muestran los oscilogramas correspondientes a la señal eléctrica de 60 Hz con una amplitud de 127 volts y en la parte inferior la señal que es suministrada a la carga, es decir, a los paneles con los focos, la cual es recortada por el triac dependiendo del ángulo de disparo controlado por el microcontrolador.

<sup>1</sup> Valor tomado del manual de Texas Instruments™, Mixed signal & analog.

Esta etapa de potencia se utiliza de igual forma para el prototipo empleado, pero para el caso del horno, se pueden utilizar etapas similares en paralelo, o en su defecto algún otro dispositivo de potencia, como los que se nombraron en el capítulo cuatro “Etapa de potencia”. La etapa de potencia descrita anteriormente desarrolla un total de 1200 Watts, con el triac Q4006.

#### 5.4 Sensores de temperatura

Para poder conocer la temperatura real en el interior del horno se utiliza el termopar tipo J descrito en el capítulo 1 “Concepto de medición y transductores”, el cual tiene una respuesta lineal, en el rango deseado (0 a 100 °C) para los fines de esta tesis, tal como lo muestra la tabla 1.1 en la que se aprecia un aumento de 0.051 mV/°C, se debe considerar además que esta señal deberá ser preamplificada y acondicionada antes de entrar al convertidor analógico digital contenido en el microcontrolador MC68HC11.

Para el acondicionamiento y *amplificación de la señal* obtenida del termopar se utiliza un amplificador de instrumentación con ganancia fija y alta impedancia de entrada como el mostrado en la Figura 5.6, donde el termopar se debe conectar de tal forma que la diferencia en las terminales del amplificador sea negativa, para que al invertirla vuelva a ser positiva, los amplificadores en configuración de seguidores se utilizan para elevar la impedancia de entrada del amplificador y poder acoplar impedancias disminuyendo la corriente que es requerida por el amplificador.

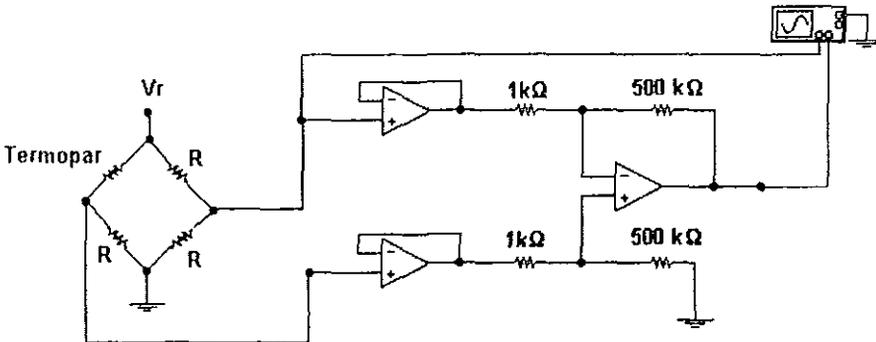


Figura 5.6 Amplificador de instrumentación para el termopar.

En la Figura 5.7 se muestra un ejemplo de la respuesta obtenida por el amplificador de instrumentación de la Figura 5.6, donde a la entrada se tiene un voltaje de  $-4.1 \text{ mV}$  correspondiente a una temperatura de  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , el cual al pasar por el amplificador de instrumentación con ganancia de 500 se obtiene un voltaje de 2 V. Este voltaje es conducido hasta el convertidor analógico digital para ser muestreado.

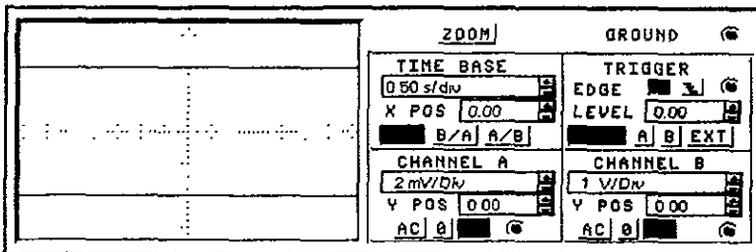


Figura 5.7 Respuesta del amplificador de instrumentación

En el caso del prototipo usado para las pruebas se empleo como sensor de temperatura el CI LM35, el cual nos entrega un voltaje proporcional a la temperatura medida, en una relación de  $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , la cual no es necesario amplificar, o en el último de los casos, utilizar una configuración de amplificador no inversor, Figura 5.8, debido a que no se puede introducir un valor de tensión negativo al convertidor.

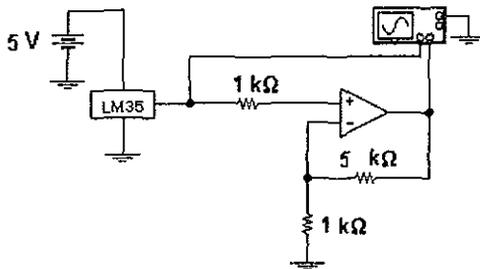


Figura 5.8 Amplificador no inversor para el LM35.

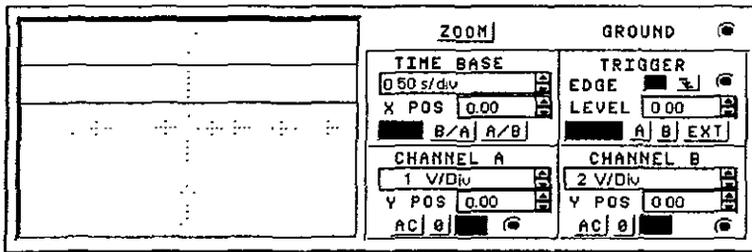


Figura 5.9 Simulación del amplificador no inversor.

En la Figura 5.9 se muestra un ejemplo de la respuesta obtenida por el amplificador no inversor de la Figura 5.8, donde a la entrada se tiene un voltaje de 800 mV (línea inferior a escala de 1 V/Div) correspondiente a una temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ , el cual al pasar por el amplificador de instrumentación con ganancia de 5 se obtiene un voltaje de 4 V. Este voltaje es conducido hasta el convertidor analógico digital para ser muestreado.

Para ambos casos se debe amplificar la señal antes de enviarse al convertidor analógico digital, y en caso de que el sensor se encuentre retirado del control, o bien en un ambiente hostil para la transmisión pura de la señal se debe utilizar cable del tipo par trenzado con blindaje para evitar al máximo la introducción de ruido electromagnético.

### 5.5 Display.

Para poder mostrar los datos de la temperatura, así como los mensajes que se necesitan para el uso del sistema se utilizó un display de cristal líquido de 16 caracteres por dos renglones, conocido como AND491, el cual se conecto como se muestra en la Figura 5.10

La terminal  $V_{DD}$  y  $V_{CC}$  se refieren al voltaje de alimentación para ambos circuitos el cual es de 5 V.

El voltaje  $V_s$ , se utiliza para el contraste en el display y este voltaje es de 0.5 V.

Las terminales PB hacen referencia a las terminales del puerto B del microcontrolador y DB a las terminales Data Bit del display.

La terminal R/W se manda directamente a tierra, lo cual significa que sólo se mandará a escribir al display y no se leerá la bandera de listo, por lo tanto se deben generar retardos.

La terminal E (Enable) de habilitación se conecta al puerto A terminal 4, en esta terminal se mandan a escribir pulsos.

La terminal RS se utiliza para indicar al display, si se está enviando un dato escribiendo un cero o un comando escribiendo un uno.

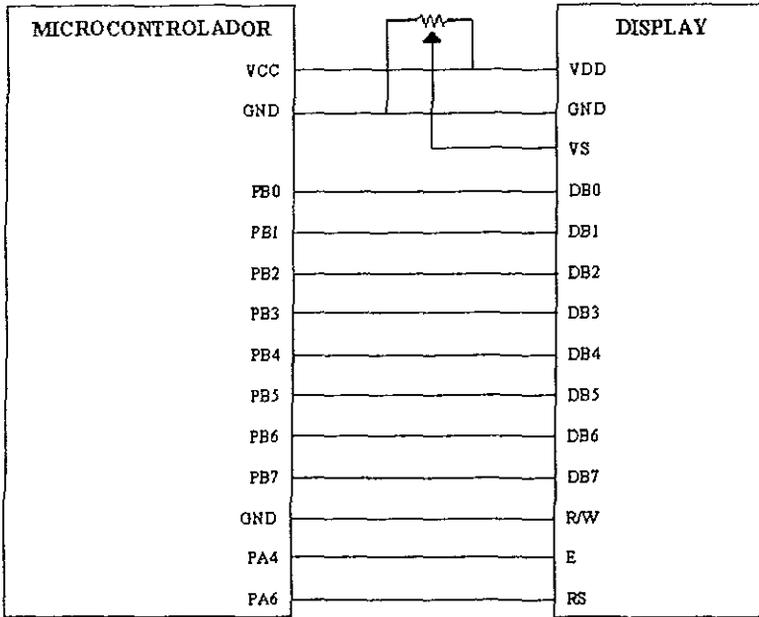


Figura 5.10 Diagrama de conexión del display

## 5.6 Paneles con focos

Para poder aumentar la temperatura del horno se diseñaron seis paneles, cada panel contiene 70 focos incandescentes del tipo spot de 200 Watts. La eficiencia de estos focos es del 25%, lo cual significa que tres cuartas partes se pierden en calor y sólo una cuarta parte es desarrollado en energía luminosa, pero para los fines de esta tesis, este tipo de focos tiene una eficiencia del 75%, debido a que el objetivo es utilizar la energía calorífica que estos focos desarrollan y el 25% restante es utilizado para la iluminación del recinto, aprovechando así al máximo las características que nos proporcionan.

Las dimensiones propuestas para el horno son 8.0 m de largo por 4.0 m de ancho y 2.5 m de alto lo que nos da un volumen  $80 \text{ m}^3$  de material térmico, y necesita de una potencia de 80 KW para poder alcanzar una temperatura homogénea de  $100^0 \text{ C}$ . Cada panel debe de desarrollar un mínimo de 15 KW con 70 focos, o en su defecto utilizar resistencias que proporcionen el calor necesario.

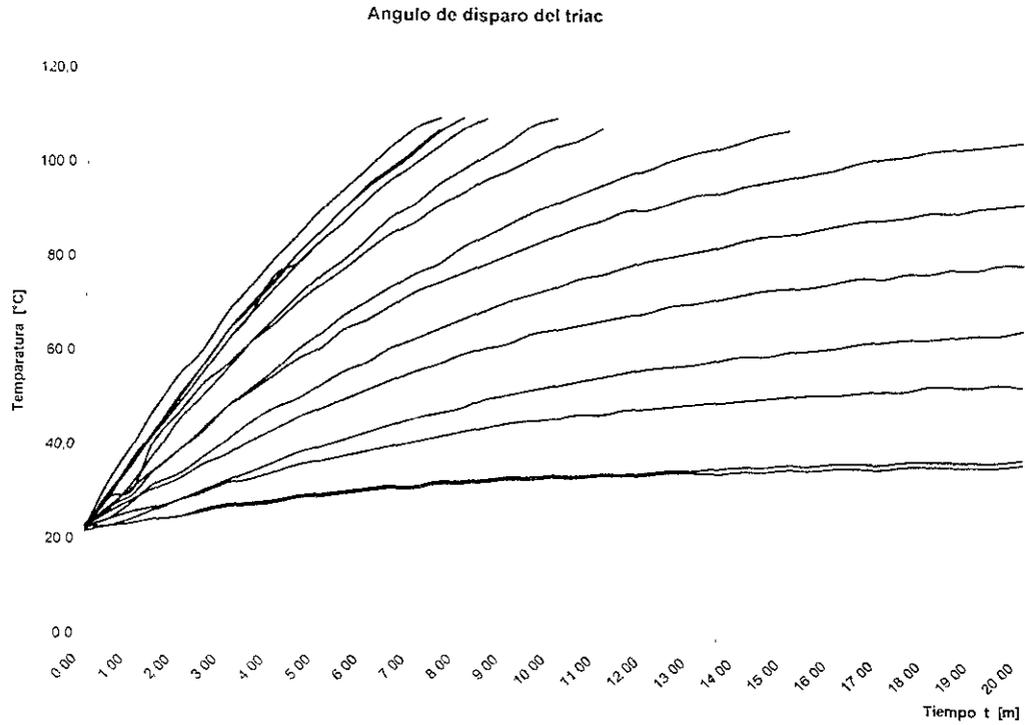
Se utilizó un horno de prueba con las siguientes dimensiones 0.8 m de largo por 0.4 m de ancho y 0.5 m de alto, con un volumen de  $0.16 \text{ m}^3$  de unicef y necesita de una potencia de 160 Watts par alcanzar una temperatura homogénea de  $100^0 \text{ C}$ .

### 5.7 Resultados.

Una vez concluido el sistema de control se tomaron lecturas de la temperatura del horno de pruebas contra el tiempo para determinar su resistencia térmica, capacitancia térmica y tiempo de respuesta para distintos ángulos de disparo del triac, obteniéndose los siguientes resultados.

Tiempo	Cargas de las parrillas (kg)														
	200A	210A	212A	218A	224A	240A	250A	251A	252A	253A	254A	255A	256A	257A	
	30	30	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
0 00	27,0	27,0	23,0	23,0	23,0	22,5	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
0 30	23,0	23,0	24,5	23,0	26,0	24,5	27,0	27,0	29,0	26,5	29,0	26,5	29,0	29,5	30,0
1 00	23,5	23,5	26,0	24,5	28,5	28,5	28,0	31,0	29,5	30,5	32,0	30,0	30,0	36,0	36,0
1 30	24,5	24,5	27,0	26,5	31,0	32,0	35,0	35,0	41,5	38,5	43,0	43,0	43,0	43,5	48,0
2 00	25,0	25,0	28,5	28,5	33,0	34,0	39,0	39,0	47,0	45,5	49,0	49,0	50,0	50,5	55,0
2 30	26,0	26,0	30,0	30,5	36,0	37,5	43,5	43,0	53,0	50,5	55,5	55,5	57,0	57,0	60,5
3 00	27,0	27,5	32,0	32,5	38,0	41,0	48,0	48,0	57,0	56,0	62,0	62,0	64,0	64,0	68,0
3 30	27,5	28,0	33,0	34,5	41,0	45,0	51,5	52,0	62,0	62,0	68,0	68,0	69,5	70,0	74,0
4 00	28,0	28,5	34,5	36,5	43,5	48,0	55,0	56,0	66,0	67,0	73,5	76,5	75,0	75,5	80,0
4 30	29,0	29,5	36,0	38,5	46,0	50,0	58,5	60,5	70,5	72,0	79,0	79,0	81,0	81,0	85,0
5 00	29,5	30,0	37,0	40,0	48,0	53,0	61,0	64,0	74,5	76,5	84,0	84,0	86,0	86,0	90,5
5 30	30,0	30,5	38,0	41,5	50,0	56,0	65,0	68,0	78,0	80,0	88,0	88,0	91,0	91,0	95,0
6 00	30,5	31,0	39,0	43,0	52,0	58,0	67,0	71,0	82,0	84,5	93,0	93,0	95,5	96,0	99,5
6 30	31,0	31,5	40,0	44,5	54,0	61,0	70,0	74,0	85,5	89,0	97,0	97,0	99,0	99,5	104,0
7 00	31,0	31,5	41,0	46,0	56,0	63,0	73,0	77,0	88,0	92,0	100,5	100,5	103,0	103,5	108,0
7 30	32,0	32,5	42,0	47,0	57,5	65,0	75,0	79,0	91,5	96,0	104,0	104,0	107,0	107,5	110,0
8 00	32,0	32,5	43,0	48,0	59,5	67,0	77,0	82,5	94,0	99,0	107,5	107,5	110,0		
8 30	32,5	33,0	44,0	50,0	61,0	69,0	79,0	85,0	97,0	102,0	110,0				
9 00	33,0	33,5	45,0	51,0	62,0	71,0	81,0	87,5	99,0	105,0					
9 30	33,0	33,5	45,5	52,0	64,0	73,5	83,0	90,0	101,5	108,5					
10 00	33,5	34,0	46,0	53,0	65,0	74,0	85,0	92,0	104,0	110,0					
10 30	33,5	34,0	47,0	54,0	66,0	76,0	87,0	94,0	105,5						
11 00	34,0	34,5	47,0	55,0	67,0	77,0	88,5	96,0	108,0						
11 30	34,0	34,5	48,0	56,0	68,0	78,5	90,5	98,0							
12 00	34,5	35,0	48,5	57,0	69,0	80,0	91,0	99,5							
12 30	35,0	35,5	49,0	57,5	70,5	81,0	92,5	101,5							
13 00	35,0	35,5	49,5	58,0	71,0	82,0	94,0	103,0							
13 30	35,0	36,0	50,0	59,0	72,0	83,0	94,5	104,0							
14 00	35,5	36,5	50,5	60,0	73,0	84,5	96,0	105,5							
14 30	35,5	36,5	51,0	60,0	74,0	85,5	97,0	107,0							
15 00	36,0	37,0	51,5	61,0	74,5	86,0	98,0	108,0							
15 30	36,0	37,0	52,0	61,5	75,0	87,0	99,0								
16 00	36,5	37,5	52,0	62,0	76,0	88,0	100,0								
16 30	36,5	37,5	52,5	63,0	77,0	89,0	101,5								
17 00	36,5	37,5	53,0	63,5	77,0	89,5	102,5								

Tiempo	Cargas de disparo del trazo														
	3663	1265	2127	2889	2711	2440	2041	1811	1973	1505	1237	0003+00	0333	0750	0300
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
	Temperatura [°C]														
17:30	37,0	38,0	53,0	64,0	76,0	90,0	103,0								
18:00	37,0	38,0	54,0	64,0	78,0	91,0	104,0								
18:30	37,0	38,0	54,0	64,5	79,0	91,0	104,5								
19:00	37,0	38,0	54,0	65,0	79,0	92,0	105,0								
19:30	37,0	38,0	54,5	65,0	80,0	92,5	105,5								
20:00	37,5	38,5	54,0	66,0	80,0	93,0	106,0								



## Conclusión

Durante el capítulo se describió detalladamente el diseño y construcción del controlador y del prototipo utilizado, como se pudo apreciar toda el diseño está basado en el microcontrolador, elemento primario del diseño, este componente permite realizar varias tareas de forma automatizada sin correr grandes riesgos, debido a que tiene una alta eficiencia por su gran velocidad.

Del microcontrolador se utilizó lo siguiente:

1. Puerto A, Entrada por captura/Salida por comparación y Control de display.
2. Puerto B, Display.
3. Puerto C, Teclado.
4. Puerto D, Comunicaciones serie (Sólo en la etapa de diseño).
5. Puerto E, Convertidor A/D.
6. RAM, Variables y datos.
7. EEPROM, Programa.
8. C.P.U. Funcionamiento del programa.

Se puede observar, que si se hubiera utilizado componentes analógicos para desarrollar el sistema descrito, el espacio físico y número de componentes crecería excesivamente.

## Capítulo 6

### Diseño del programa

---

#### 6.1 Programación.

La programación no es un campo de reciente exploración para los ingenieros en electrónica, debido a que con la invención del microprocesador se vieron en la necesidad de aprender uno o más lenguajes de programación para poder realizar tareas que antiguamente se llevaban a cabo con componentes puramente analógicos y de esta forma adaptar el hardware existente para que pudiera ser gobernado por medio de un microcontrolador o más aún, como en el caso de esta tesis, crear un nuevo sistema basado en esta tecnología para resolver un problema existente.

Lenguaje de programación: cualquier lenguaje artificial que puede utilizarse para definir una secuencia de instrucciones para su procesamiento. Se asume generalmente que la traducción de las instrucciones a un código que comprende la computadora debe ser completamente sistemática. Normalmente es la computadora la que realiza la traducción. Los lenguajes se dividen en dos grandes grupos:

- 1) Lenguajes de bajo nivel
- 2) Lenguajes de alto nivel.

### 1) Lenguajes de bajo nivel

Vistos a muy bajo nivel, los microprocesadores procesan exclusivamente señales electrónicas binarias. Dar una instrucción a un microprocesador supone en realidad enviar series de unos y ceros espaciadas en el tiempo de una forma determinada. Esta secuencia de señales se denomina código máquina. El código representa normalmente datos y números e instrucciones para manipularlos. Un modo más fácil de comprender el código máquina es dando a cada instrucción un mnemónico, como por ejemplo STORE, ADD o JUMP. Esta abstracción da como resultado el ensamblador, un lenguaje de muy bajo nivel que es específico de cada microprocesador.

Los lenguajes de bajo nivel permiten crear programas muy rápidos, pero que son a menudo difíciles de aprender. Más importante es el hecho de que los programas escritos en un bajo nivel sean altamente específicos de cada procesador. Si se lleva el programa a otra máquina se debe reescribir el programa desde el principio.

### 2) Lenguajes de alto nivel

Por lo general se piensa que las computadoras son máquinas que realizan tareas de cálculos o procesamiento de textos. La descripción anterior es sólo una forma muy esquemática de ver a una computadora. Hay un alto nivel de abstracción entre lo que se pide a la computadora y lo que realmente comprende. Existe también una relación compleja entre los lenguajes de alto nivel y el código máquina.

Los lenguajes de alto nivel son normalmente fáciles de aprender porque están formados por elementos de lenguajes naturales, como el inglés. En BASIC, el lenguaje de alto nivel más conocido, los comandos como "IF CONTADOR = 10 THEN STOP" pueden utilizarse para pedir a la computadora que pare si CONTADOR es igual a 10. Por desgracia para muchas personas esta forma de trabajar es un poco frustrante, dado que a pesar de que las

computadoras parecen comprender un lenguaje natural, lo hacen en realidad de una forma rígida y sistemática.

### 6.1.1 Compiladores

La traducción de una serie de instrucciones en lenguaje ensamblador (el código fuente) a un código máquina (o código objeto) no es un proceso muy complicado y se realiza normalmente por un programa especial llamado compilador. La traducción de un código fuente de alto nivel a un código máquina también se realiza con un compilador, en este caso más complejo, o mediante un intérprete. Un compilador crea una lista de instrucciones de código máquina, el código objeto, basándose en un código fuente. El código objeto resultante es un programa rápido y listo para funcionar, pero que puede hacer que falle el ordenador si no está bien diseñado.

En nuestro caso, nosotros trabajamos con lenguaje ensamblador que como se describió anteriormente es un lenguaje de bajo nivel y es específico para este tipo de microcontrolador para poder programarlo se utilizó un compilador (ensamblador) y un programa monitor. El compilador usado es el IASM11 (Integrated Assembler - Versión 3.0), el cual provee Motorola con su tarjeta de desarrollo. El programa monitor empleado es el PUMMA (Programa Unificador Microcontrolador Microcomputadora Anfitriona – Versión 1.61) desarrollado por el Ing. Antonio Salvá Calleja, profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

## 6.2 Pseudocódigo del programa

Se desea que el programa lea un valor de temperatura deseada, e inicie a controlar los paneles, ya sea para aumentar o disminuir la temperatura, hasta alcanzar el valor deseado, en ese momento debe de mandar una señal de que el horno ya se encuentra listo para ser utilizado, y por ningún motivo debe de separarse la temperatura de este rango de valores, a menos que suceda algún evento externo al mismo control, (por ejemplo, una perturbación en la línea de alimentación).

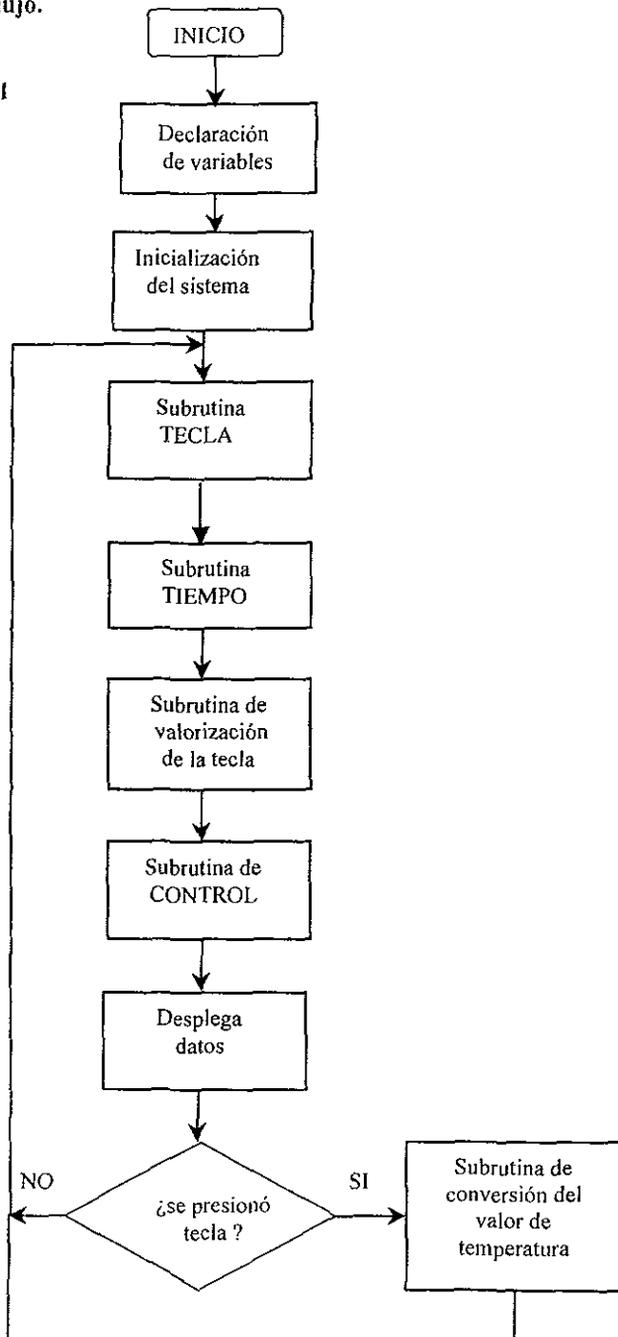
Por otro lado se desea que el control sea capaz de poderse modificar, es decir, el valor de temperatura deseada puede cambiar a placer del usuario en cualquier momento, así como poder terminar la ejecución del programa.

Se ha pensado en la siguiente solución:

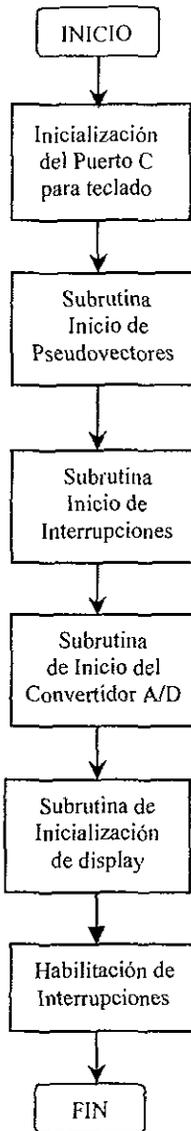
Al iniciar el programa, leer un valor para la temperatura que se desea, posteriormente, comparar este valor contra la temperatura que se tiene en cada uno de los paneles, y dependiendo de la diferencia existente mandar una señal de corrección correspondiente al error que se tenga, ya sea para aumentar o disminuir la temperatura. Debido a que se tienen ocho paneles, en el que en cada uno, su temperatura es sensada por un termopar, necesitamos digitalizar cada una de estas señales, compararla y mandar una respuesta para cada panel, ya que estos son independientes uno de otro, razón por lo cual, hay que realizar una multiplexación entre estas señales (Entrada de los termopares y Salida a las etapas de potencia).

6.3 Diagramas de flujo.

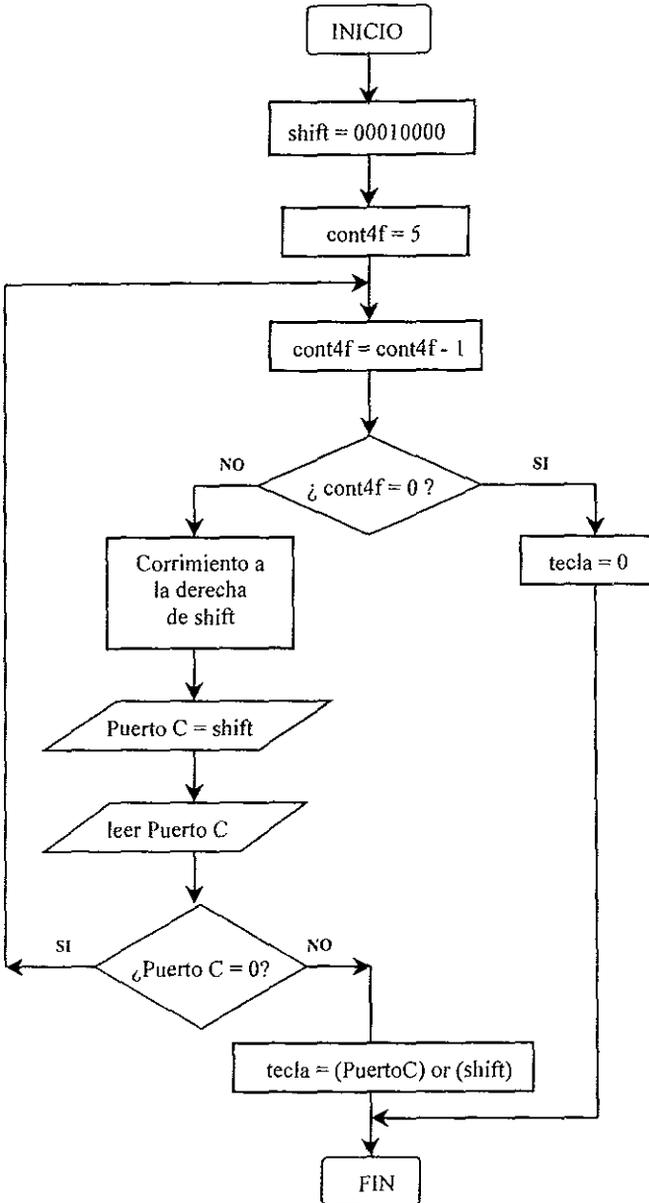
Programa principal



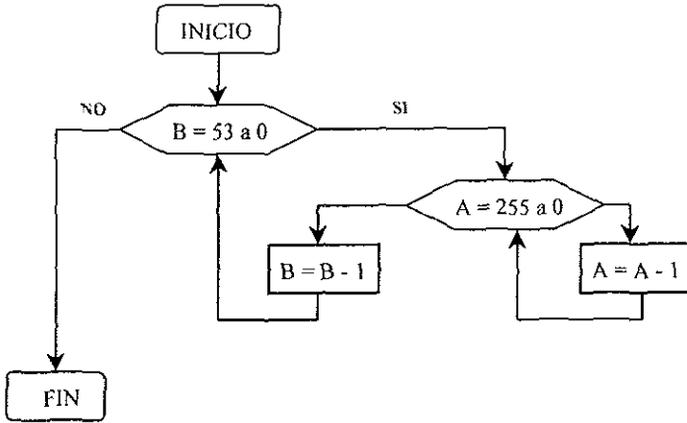
Inicialización del sistema



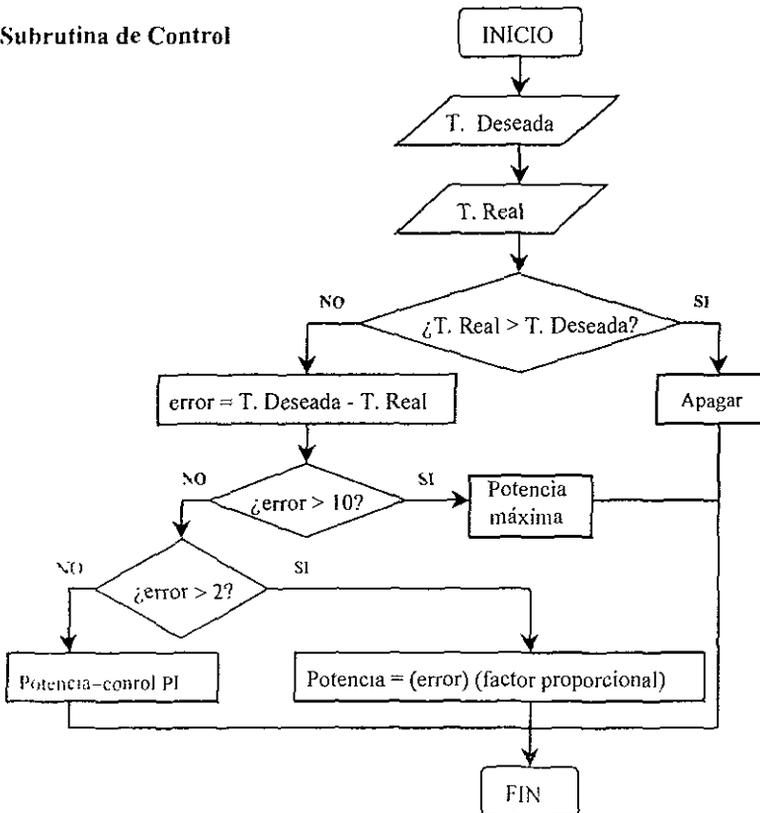
Subrutina de Tecla



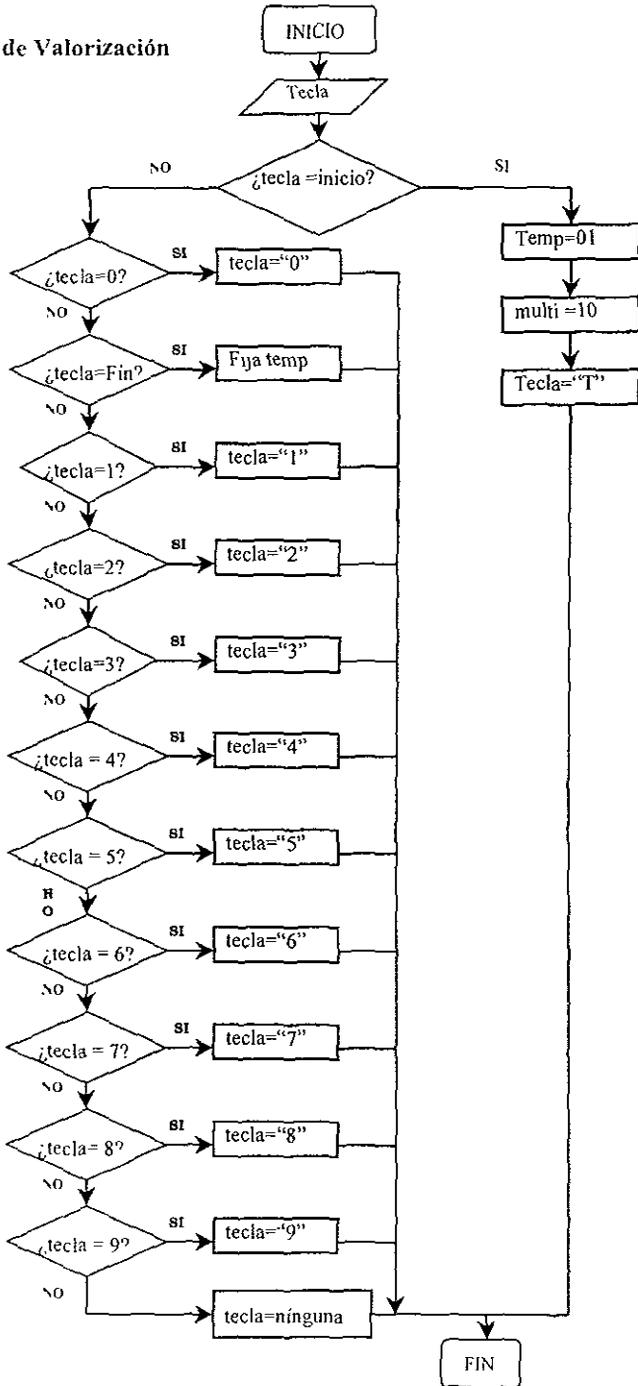
Subrutina de Tiempo



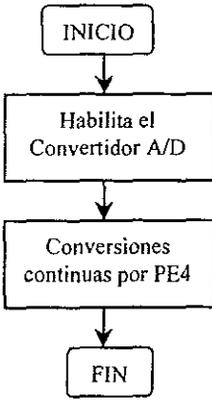
Subrutina de Control



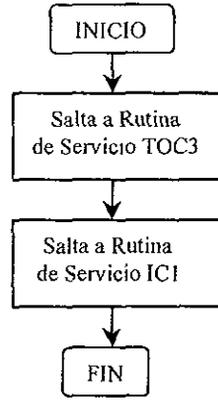
Subrutina de Valorización  
de la tecla



Subrutina del inicio del convertidor A/D

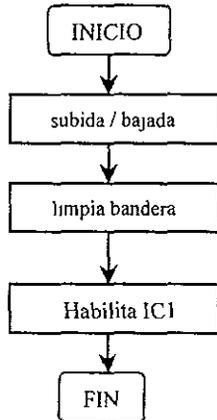


Subrutina de inicio de pseudovectores

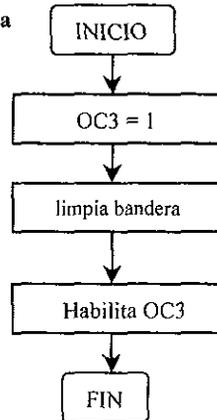


Subrutina de inicio de interrupciones

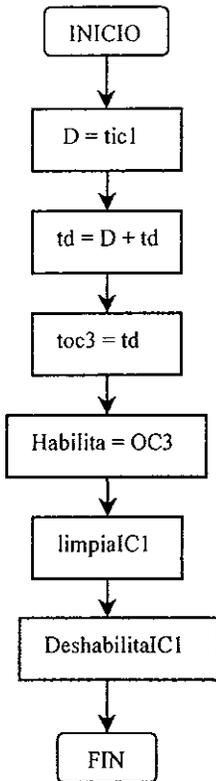
Entrada



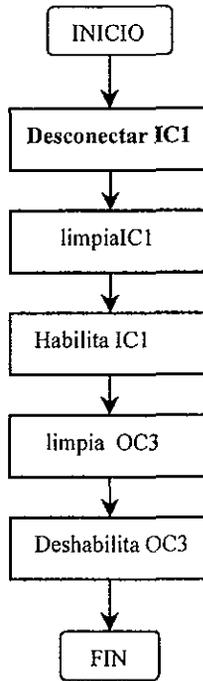
Salida



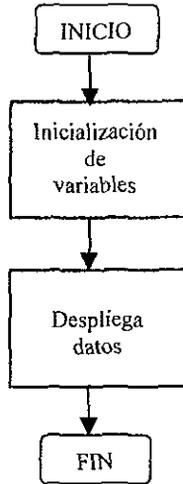
Servicio de IC1



Servicio de OC3



### Subrutina de inicialización del display



### 6.4 Listados de los programas.

A continuación se detallarán y explicarán los programas empleados, primero utilizando únicamente los programas fuentes, los cuales tienen una breve explicación por línea y por subrutina y posteriormente se tendrá un segundo listado con el código fuente antecedido por el código ensamblado por el compilador IASM11.

```
*****
*      Nombre Tesis.all      *
*****
```

```
stack    equ    $0047
```

```
*****
* Declaración de variables *
*****
```

```
tecla     ds $01    ; Tecla según conf. de portc (hardware).
tec_asc   ds $01    ; Equivalente de la tecla en ascii.
cont4f    ds $01    ; Contador de 4 (para scan de filas).
shift     ds $01    ; corrimiento de bits en el teclado.
multi1    ds $01    ; Factor de multiplicación.
temp      ds $01    ; Valor de la temperatura deseada.
desp      ds $01    ; Tecla a desplegar.
td        ds $02    ; ángulo de disparo.
aux1      ds $01    ; Variable auxiliar de 1 byte.
aux       ds $02    ; Auxiliar para el control.
aux2      ds $02    ; Idem.
error     ds $01    ; Error = T. Deseada - T. Real.
real      ds $01    ; Temperatura Real.
AD1       ds $01    ; Temp reall.
AD2       ds $01    ; Idem.
AD3       ds $01    ; Idem.
AD4       ds $01    ; Idem.
TabRAM    ds $05    ; Variable para conversión de bases.
ApderAM   ds $02    ; Apuntador de Ram
datos     ds $04    ; Dato a desplegar
```

```
$INCLUDE "REG6811A.EQU"
$INCLUDE "DISPLAY.MAC"
```

```
org $F800
```

```
lds #stack
ldx #regbase
ldaa #$0F          ; Salidas de C0 a C3
staa ddrc,x       ; Entradas de C4 a C7
jsr sin-psv       ; Inicializa los pseudovectores.
jsr sini_vt       ; Inicializa interrupciones del timer
jsr convertidor   ; Inicializa el convertidor A/D
jsr ini_disp      ; Inicializa el Display
ldaa #$FF
staa multi
ldd #$3030
std datos
cli
```

```

main.
    jsr s_tecla      ; Regresa con el valor de la tecla.
    jsr tiempo      ; Tiempo para estabilizar la tecla.
    jsr s_t_asc     ; Devuelve el valor de la tecla.
    jsr promedio
    jsr control
    ldaa multi
    cmpa #$FF       ; No se esta fijando temp
    bne dis2
    display T_ci,datos

dis2
    ldaa tec_asc
    cmpa #$FF       ; Verifica que no se ha presionado tecla
    beq main
    jsr conversion
    display nueva,datos
    jmp main

```

```

*****
* Subrutina de lectura y control del convertidor *
*****

```

```

control
    ldaa real
    cmpa temp       ; Si T. Deseada > Real --> Apagar
    bpl apagar

    ldaa temp       ; En otro caso error = T. Deseada - Real
    suba real
    staa error
    cmpa #$0A       ; Si error > 10 ----> Máximo
    bpl maximo

    cmpa #$03       ; Error máximo 1/2 grado
    blo PI

    ldab #$0A       ;Error máximo $A * $58C --> Acumulador B
    mul             ;58C = A * 8E
    ldaa #$8E
    mul
    std aux         ; aux = error * factor proporcional (58C)
    ldd #$3800      ; td = 3800 - error * factor (58C)
    subd aux
    std td
    jmp fin_con

PI
    ldaa temp       ; td = Maximo - Temp * Kp - error * Ki
    ldab #$35       ; Kp

```

```

mul
std aux
ldaa error
ldab #$35 ; Ki
mul
std aux2
ldd #$3800
subd aux
subd aux2
std td
jmp fin_con

```

Maximo

```

ldd #$0150
std td
jmp fin_con

```

apagar

```

ldd #$3800
std td

```

fin\_con

```

hex-dec real,TabRam
ldd TabRam+1
std datos+2
rts

```

```

*****
* Subrutina que lee tecla y devuelve en TECLA *
* el valor binario de la tecla apretada *
*****

```

s\_tecla

```

ldx #regbase
ldaa #%00010000
staa shift
ldaa #$05
staa cont4f
sig_fila dec cont4f
beq f_s_tec ;brinca a la siguiente si es cero
clc ;limpia el bit Carry del CCR
ror shift ;ROTate Right
ldaa shift
staa portc,x ;escribe en el puerto C
nop
nop
ldaa portc,x ;lee del puerto C
anda #$f0
cmpa #00
beq sig_fila ; si no hubo ninguna tecla apretada.
oraa shift ; A = (shift) or (A)

```

```

f_s_tec   bra   finstec
finstec   clra           ; A = 0.
          staa  tecla
          rts

```

```

*****
*   Subrutina que obtiene el promedio de la temperatura y lo   *
*   regresa en la variable REAL                                *
*****

```

```

promedio
  pshx
  clra
  ldab $1031
  ldx  #$02
  idiv
  stx  aux
  ldd  aux
  stab ad1
  clra
  ldab $1032
  ldx  #$02
  idiv
  stx  aux
  ldd  aux
  stab ad2
  clra
  ldab $1033
  ldx  #$02
  idiv
  stx  aux
  ldd  aux
  stab ad3
  clra
  ldab $1034
  ldx  #$02
  idiv
  stx  aux
  ldd  aux
  stab ad4
  ldaa ad1
  ldab ad2
  aba
  staa real
  clra
  ldab real

```

```

ldx  #$02
ldiv
stx  aux
ldaa ad3
ldab ad4
aba
staa real
clra
ldab real
ldx  #$02
ldiv
stx  aux2

ldaa aux+1
ldab aux2+1
aba
staa real
clra
ldab real
ldx  #$02
ldiv
stx  aux
ldd  aux
stab Real
pulx
rts

```

```

*****
* Subrutina para escribir en la variable Tec_asc el valor de *
* la tecla *
*****

```

```

s_t_asc
ldaa  tecla
cmpa  #$11
bne   tec0
ldaa  #$00    ;inicializa variable TEMP
staa  temp
ldaa  #$0A    ;inicializa variable MULTI
staa  multi
ldd   #$3030
std   datos
displey  fijar,temperatura
ldaa  #$24    ;tecla T Temperatura
jmp   fs_asc

cmpa  #$21

```

```

        bne    tecF
        ldaa  #$00    ;tecla 0
        jmp   fs_asc

tecF
        cmpa  #$41
        bne  tec1
        display t_inicia,tdeRa
        ldaa  #$FF
        staa  multi
        ldaa  temp    ; Factor de corrección
        ldab  #$03    ; Temp = temp + 2
        staa  temp
        ldaa  #$16    ;tecla de Función especial "F"
        jmp   fs_asc

tec1
        cmpa  #$12
        bne  tec2
        ldaa  #$01
        jmp   fs_asc

tec2
        cmpa  #$22
        bne  tec3
        ldaa  #$02
        jmp   fs_asc

tec3
        cmpa  #$42
        bne  tec4
        ldaa  #$03
        jmp   fs_asc

tec4
        cmpa  #$14
        bne  tec5
        ldaa  #$04
        jmp   fs_asc

tec5
        cmpa  #$24
        bne  tec6
        ldaa  #$05
        jmp   fs_asc

tec6
        cmpa  #$44
        bne  tec7
        ldaa  #$06
        jmp   fs_asc

tec7
        cmpa  #$18
        bne  tec8
        ldaa  #$07
        jmp   fs_asc

tec8
        cmpa  #$28

```

```

        bne    tec9
        ldaa  #$08
        jmp   fs_asc

tec9    cmpa  #$48
        bne  No_tec
        ldaa  #$09
        jmp  fs_asc

No_tec  ldaa  #$FF

fs_asc  staa tec_asc
        rts

```

```

*****
*   Pierde tiempo para evitar rebotes   *
*****

```

```

tiempo
    psha
    pshb
    ldab #$30

loop1
    ldaa #$FF
    cmpb #$00
    beq f11 ;fin loop1

loop2
    cmpa #$00
    beq f12 ;fin loop 2
    nop
    nop
    nop
    nop
    deca
    bra loop2

f12
    decb
    bra loop1

f11
    pula
    pulb
    rts

```

```

*****
*Subrutina para convertir dos teclas en un sólo valor decimal *
*****

```

```

conversion
    ldaa tec_asc
    cmpa #$24 ;T para fijar temp
    beq f_conv
    cmpa #$16 ;F Fin de temperatura
    beq f_conv
    ldab multi
    stab aux1
    mul
    addb temp
    stab temp
    ldaa #$01
    staa multi
    nex-dec temp,tabRam
    ldd tabRam+1
    std datos
f_conv
    rts

```

```

*****
* Servicio del TOC3 *
*****

```

```

servtoc3
    nop
    lux =regbase
    near tocl1,x,%00110000 ; desconecto del sist. Timer PA5
    near porta,x,%00100000 ; PA5 = 0 (oc3)

```

```

                                ; apaga el disparo del triac
bclr tflgl,x,%11111011 ; pba      limpia bandera icl
bset tmskl,x,%00000100 ; pba      re-habilita icl

bclr tflgl,x,%11011111 ;limpia bandera oc3
bclr tmskl,x,%00100000 ;deshabilita oc3
rti

```

```

*****
* Subrutina de inicialización del display *
*****

```

```

ini_disp
    pshx
    ldaa    #$30
    staa    TabRAM
    staa    TabRAM+1
    staa    TabRAM+2
    staa    TabRAM+3
    staa    TabRAM+4
    ldx     #TabRAM
    stx     ApdeRAM
    display T_inicia,TdeRa
    pulx
    rts

```

```

*****
* Tabla del letrero principal *
*****

```

```

TdeRa
T_inicia    equ    *
            DB     0,$30 ;inicialización en modo de 8 bits
            db     0,$30 ;p.p. del manual 5-30
            db     0,$30
            db     0,$38
            db     0,$0c ;Display On
            db     0,$01 ;Display Clr
            db     0,$80 ;Set DDRAM
            db     $02,'D' ; 1
            db     $02,'E' ; 2
            db     $02,'S' ; 3
            db     $02,'E' ; 4
            db     $02,'A' ; 5
            db     $02,'D' ; 6
            db     $02,'A' ; 7

```

```

db      $02, ' '           ; 8
db      $02, ' '           ; 9
db      $02, 'R'          ;10
db      $02, 'E'          ;11
db      $02, 'A'          ;12
db      $02, 'L'          ;13
db      $02, ' '           ;14
db      $ff                ;terminador de tabla

```

T\_ci

```

db      0,$C0              ; segunda línea
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $01
db      $01
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $02, ' '
db      $01
db      $01
db      $ff

```

```

*****
*   Tabla para Fijar temperatura   *
*****

```

Temperatura

Fijar

```

equ      *
db      0,$01 ;Display Clr
db      $02, ' '           ; 1
db      $02, 'T'          ; 2
db      $02, 'E'          ; 3
db      $02, 'M'          ; 4
db      $02, 'P'          ; 5
db      $02, 'E'          ; 6
db      $02, 'R'          ; 7
db      $02, 'A'          ; 8
db      $02, 'T'          ; 9
db      $02, 'U'          ;10
db      $02, 'R'          ;11
db      $02, 'A'          ;12
db      $02, '?'          ;13
db      $02, ' '           ;14
db      $ff                ;terminador de tabla

```

```
nueva      equ      *
           db      0,$C0          ;escribe el segundo renglón
           db      $02,' '       ; 1
           db      $02,' '       ; 2
           db      $02,' '       ; 3
           db      $02,' '       ; 4
           db      $01           ; 5
           db      $01           ; 6
           db      $02,' '       ; 7
           db      $02,' '       ; 8
           db      $ff          ;terminador de tabla
```

```
*****
* Pulso de enable ;Genera un pulso en PA6 alto,bajo *
*****
```

enable

```
lpel
           ldy     #regbase
           bclr   porta,y,%01000000
           jsr    delay
           bset   porta,y,%01000000
           jsr    Delay
           rts
```

```
*****
* Rutina de retardo *
*****
```

```
Delay      pshx
           ldx     #$0100
lpdi       dex
           bne     lpdi
           pulx
           rts
```

```
*****
* Archivos utilizados *
*****
```

CONCLUDE "INI.All"

```
$INCLUDE "TOC3.A11"
$INCLUDE "IC1.A11"
```

```
*****
* Registros internos del microcontrolador 68HC11 *
* Archivo: REG6811.EQU *
*****
```

```
porta      equ      $00
portB      equ      $04
portC      equ      $03
ddrc       equ      $07
portD      equ      $08
ddrd       equ      $09
```

```
; Registros del Temporizador
```

```
tmsk2      equ      $24 ; Timer Mask 2
tflg2      equ      $25 ; Timer Flag 2
pact1      equ      $26 ; Pulse Acumaltor Control Register.
```

```
tc11       equ      $20 ; Timer Control 1
tc12       equ      $21 ; Timer Control 2
```

```
tmsk1      equ      $22 ; Timer Mask 1
tflg1      equ      $23 ; Timer Flag 1
```

```
TCNT       equ      $0E ; Timer Counter.
TIC1       equ      $10 ; Timer Input Capture 1
TIC2       equ      $12 ; Timer Input Capture 2
TOC2       equ      $18 ; Timer Output Capture
TOC3       equ      $1A
TOC4       EQU      $1C
TIM05      equ      $1e
```

```
; Registros del Convertidor Analógico/Digital.
```

```
adcr1      equ      $30 ; Analogical/Digital Control Register
adr1       equ      $31 ; Registros de resultado de conversión
A/D
adr2       equ      $32 ; adr1 - adr4
adr3       equ      $33 ;
adr4       equ      $34 ;
option     equ      $39 ; Utilizado para el ADPU (Activa el Conv.
A/D.
ADPRST     equ      $3a
```

, registros del SPI (Serial Peripheral Interphase)

```

spsr      equ      $28      ;control del SPI
spsr      equ      $29      ;status del SPI
spdr      equ      $2A      ;registro de datos E/S del SPI.

```

; Registro del SCI

```

BAUD      equ      $2B
SCCR1     equ      $2C
SCCR2     equ      $2D
SCSR      equ      $2E
SCDR      equ      $2F
RDRF      equ      $20      ; SCI Masks, change if required
TDPE      equ      $80
OP        equ      $08
FI        equ      $02

```

```

*****
* Registros utilizados por el RTC del HC11 *
* 0,0,SS*,SCK;MOSI,MISO,TxD,RxD (RxD & TxD direction controlled *
* by SCI) *
* For EVBU w/ RTC use $38 -> SS,SCK,and MOSI=OUTS, rest=INS *
* SPIE,SPE,DWOM,MSTR;CPOL,CPHA,SPR1,SPR0 (set to $54 for RTC *
* interface) *
* SPIF,WCOL,-,MODF;-,,-,- *
* Banderas utilizadas por el SPI *
*****

```

```

SPIF      equ      $80

```

\*\*\* Direccion Base de los registros

```

PEGBASE   equ      $1000
MPPIO     equ      $3c

r10       equ      %00000001
r11       equ      %00000010
r12       equ      %00000100
r13       equ      %00001000
r14       equ      %00010000
r15       equ      %00100000
r16       equ      %01000000

```

```

bit7      equ    %10000000

nbit0     equ    %11111110
nbit1     equ    %11111101
nbit2     equ    %11111011
nbit3     equ    %11110111
nbit4     equ    %11101111
nbit5     equ    %11011111
nbit6     equ    %10111111
nbit7     equ    %01111111

```

\* Pseudovectores de Interrupción para modo de bootstrap

```

pvsc1     equ    $00c4
pvspi     equ    $00c7
pvPAI     equ    $00ca
pvPAC     equ    $00cd
pvTO      equ    $00d0
pvTOC5    equ    $00d3
pvTOC4    equ    $00d6
pvTOC3    equ    $00d9
pvTOC2    equ    $00dc
pvTOC1    equ    $00df
pvIIC3    equ    $00e2
pvIIC2    equ    $00e5
pvIIC1    equ    $00e8
pvrt1     equ    $00eb
pvIRQ     equ    $00ee
pvXIRQ    equ    $00f1
pvSWI     equ    $00f4
pvICP     equ    $00f7
pvCCP     equ    $00fa
pvCLK     equ    $00fd

```

```

*****
* Nombre ini.a11 *
* inicializaciones diversas *
*****

```

```

*****
*sini_yt inicializa vectores del timer *
*****

```

```

sini_yt equ *

        ldx    #Regbase
        bset   tctl2,x,%00110000 ;habilita any edge
        bclr   tflg1,x,%11111011 ;limpia bandera icl
        bset   tmsk1,x,%00000100 ;habilita icl
        rts

```

```

*****
* Inicio de OC3 *
*****

```

```

sini-oc3

        bset   tctl1,x,%00110000 ;OC3 =1 en el Match de TCNT
        bclr   tflg1,x,%11011111 ;limpia bandera oc3
        bset   tmsk1,x,%00100000 ;habilita oc3
        rts

```

```

*****
* Inicialización de los Pseudovectores de Interrupción *
*****

```

```

sini-psv equ *

        ldaa   #$7e
        staa   pvtoc3
        staa   pvtic1
        ldx    #sertoc3
        stx    pvtoc3+1
        ldx    #sertic1
        stx    pvtic1+1
        rts

```

```
*****
*   Habilitación del convertidor A/D   *
*****
```

```
convertidor
    LDAA #$80      ;habilitar el convertidor
    STAA $1039    ;se almacena en el ADPU del registro OPTION
    LDAA #$24     ;SCAN = 1 y CC = 1
    STAA $1030    ;Entrada PE4
    RTS
```

```
*****
*   Servicio del TIC1                 *
*****
```

```
SERTIC1
    ldx #regbase
    ldd tic1,x
    addd td
    std toc3,x
    jsr sini-oc3
    bclr tflg1,x,%11111011 ;limpia bandera ic1
    bclr tmsk1,x,%00000100 ;Deshabilita IC1
    rti
```

```
*****
*   macro displey                     *
*****
```

```
Smacro displey Tcont,TRAM
    ldx      #2
    stx     ApdeRAM
    ldy     #regbase
    ldx     #1 ;x=tabla control
lpIni:    ldaa    0,x
          cmpa   #$ff
          beq   jpIniCo
          jmp   noojp
jpIniCo:  jmp   IniCond
noojp:    cmpa   #$00
          beq   L01
          jmp   Inil
L01:
```

```

        clr      porta,y
        jmp      sin1
Ini1    cmpa     #$01
        beq     jpVram ;
        jmp     nosalt
jpVram  jmp      Vram
nosalt  jmp      Ini2 ;

Vram    pshx
        ldx     ApdeRAM
        inc     ApdeRAM+$01
        ldaa   $0,x
        pulx
        ldab   #$10
        stab   porta,y
        jmp    Despdatl

Ini2    ldab   #$10
        stab   porta,y
sini    inx    ;se trata de un caracter no variable
        ldaa   $0,x
Despdatl
        staa   portb,y
        jsr    enable ;pulso en enable
        inx    ;para el siguiente Byte
        jmp    lpIni

IniCona
        ldx    #%2
        stx    ApdeRAM

$macroend

```

```

*****
* macro para convertir dos números hexadecimales(un byte) *
* 3 dígitos decimales, asquii; La variable de salida *
* se especifica en ramout(ram de salida) *
*****

```

```

$macro hex-dec result,ramout
        ldx    #%1
        clra
        ldab   0,x
        ldx    #$64 ;Se carga de mediante A,B porque A
                   ;siempre debe ser cero

        idiv
        xgdx

```

```

    addb    $$30          ;conversión asqui
    stab   %2
    xgdx
    ldx    $$0a
    idiv
    xgdx
    addb   $$30          ;conversión asqui
    stab   %2+1
    xgdx
    addb   $$30          ;conversión asqui
    stab   %2+2
$macroend

```

## Conclusión

Durante el capítulo se describió detalladamente el diseño del programa: para lo cual se hace necesario utilizar las herramientas de programación como son:

1. Pseudocódigo: Explica en lenguaje natural el desarrollo del programa.
2. Diagramas de flujo: Describe de manera gráfica y ordenada la lógica de programación.
3. Programa: Escritura del programa, siguiendo la sintaxis y regla del propio lenguaje de programación, en este caso, lenguaje ensamblador.

Para los Ingenieros en electrónica, este campo se encontraba inexplorado, hace algunos años, pero hoy día, con el surgimiento de microprocesadores y microcontroladores se hace indispensable, manejar estas herramientas que simplifican y mejoran algunos diseños electrónicos.

## Apêndice

---

## 4N25, 4N26, 4N27, 4N28 OPTOCOPLERS

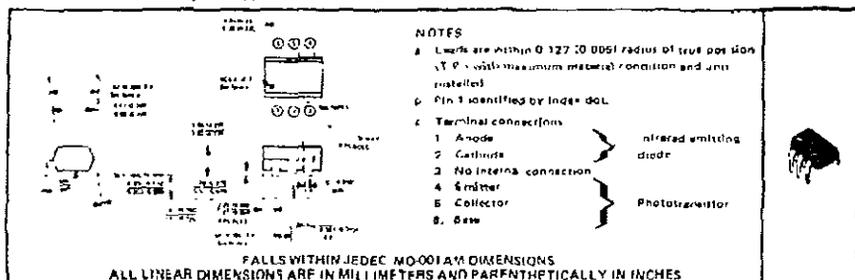
5005035 D428J SEPTEMBER 1978 - REVISED MARCH 1983

### COMPATIBLE WITH STANDARD TTL INTEGRATED CIRCUITS

- Gallium Arsenide Diode Infrared Source Optically Coupled to a Silicon N-P-N Phototransistor
- High Direct-Current Transfer Ratio
- High-Voltage Electrical Isolation . . . 2.5-kV, 1.5-kV, or 0.5-kV Rating
- Plastic Dual-In-Line Package
- High-Speed Switching . . .  $t_r = 2 \mu s$ ,  $t_f = 2 \mu s$  Typical

#### mechanical data

The package consists of a gallium arsenide infrared-emitting diode and an n-p-n silicon phototransistor mounted on a 6-lead frame encapsulated within an electrically nonconductive plastic compound. The case will withstand soldering temperature with no deformation and device performance characteristics remain stable when operated in high-humidity conditions. Unit weight is approximately 0.52 grams.



#### absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

*Peak Input-to-Output Voltage:	4N25	.....	= 2.5 kV
	4N26, 4N27	.....	= 1.5 kV
	4N28	.....	= 0.5 kV
*Collector-Base Voltage	.....		70 V
*Collector-Emitter Voltage (See Note 1)	.....		30 V
*Emitter-Collector Voltage	.....		7 V
*Emitter-Base Voltage	.....		7 V
*Input-Diode Reverse Voltage	.....		3 V
*Input-Diode Continuous Forward Current $I_F$ (for below) 25°C Free-Air Temperature (See Note 2)	.....		80 mA
*Input-Diode Peak Forward Current ( $I_{FM} = 300 \mu s$ , duty cycle = 2%)	.....		3 A
*Continuous Power Dissipation at (or below) 25°C Free-Air Temperature:			
Infrared Emitting Diode (See Note 3)	.....		150 mW
Phototransistor (See Note 3)	.....		150 mW
Total, Infrared Emitting Diode plus Phototransistor (See Note 4)	.....		250 mW
*Storage Temperature Range	.....		-55°C to 150°C
*Lead Temperature 1.5 mm (1/16 inch) from Case for 10 Seconds	.....		260°C

\*JEDEC registered data. This data sheet contains all applicable JEDEC-registered data in effect at the time of publication.

- NOTES**
- 1 The value applies when the base-emitter diode is open circuited.
  - 2 Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 1.33 mW/°C.
  - 3 Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 2 mW/°C.
  - 4 Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 3.33 mW/°C.

**PRODUCTION DATA** documents contain information current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production quantities only. Specifications include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1983 Texas Instruments Incorporated

**4N25, 4N26, 4N27, 4N28  
OPTOCOUPERS**

electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	4N25, 4N26			4N27, 4N28			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{(BR)CBO}$ Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 100 \mu A, I_E = 0, I_F = 0$	70		70				V
$V_{(BR)CEO}$ Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C = 1 \text{ mA}, I_B = 0, I_F = 0$	30		30				V
$V_{(BR)ECO}$ Emitter-Collector Breakdown Voltage	$I_E = 100 \mu A, I_B = 0, I_F = 0$	7		7				V
$I_{IR}$ Input Dark Static Reverse Current	$V_{IH} = 3 \text{ V}$		100		100			$\mu A$
$I_{C(on)}$ On-State Collector Current (Phototransistor Operation)	$V_{CE} = 10 \text{ V}, I_B = 0, I_F = 10 \text{ mA}$	2	5	1	3			mA
$I_{C(off)}$ Off-State Collector Current (Photodiode Operation)	$V_{CB} = 10 \text{ V}, I_E = 0, I_F = 10 \text{ mA}$		20		20			$\mu A$
$I_{C(off)}$ Off-State Collector Current (Phototransistor Operation)	$V_{CE} = 10 \text{ V}, I_B = 0, I_F = 0$		1	50	1	50		nA
$I_{C(off)}$ Off-State Collector Current (Photodiode Operation)	$V_{CB} = 10 \text{ V}, I_E = 0, I_F = 0$		0.1	20	0.1	20		nA
$V_{IF}$ Input Diode Static Forward Voltage	$I_F = 10 \text{ mA}$		1.25	1.6	1.25	1.5		V
$V_{LE(sat)}$ Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 2 \text{ mA}, I_B = 0, I_F = 50 \text{ mA}$		0.25	0.5	0.25	0.5		V
$r_{IO}$ Input to Output Internal Resistance	$V_{in-out} = \pm 2 \text{ kV}$ for 4N25, $\pm 1.5 \text{ kV}$ for 4N26, 4N27, $\pm 0.6 \text{ kV}$ for 4N28. See Note 5		$10^{11}$	$10^2$	$10^{11}$	$10^{12}$		$\Omega$
$C_{IO}$ Input to Output Capacitance	$V_{in-out} = 0, f = 1 \text{ MHz}$ , See Note 5		1		1			pF

<sup>1</sup>JEDEC registered data

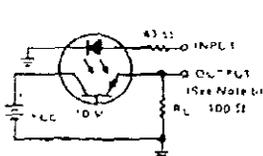
<sup>2</sup>Note 5: These parameters are measured between both input node leads shorted together and all the phototransistor leads shorted together

switching characteristics at 25°C free-air temperature

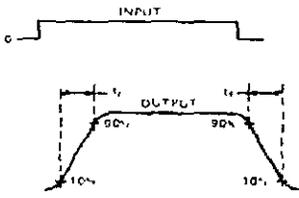
PARAMETER	TEST CONDITIONS	TYP	UNIT
$t_r$ Rise Time	Phototransistor Operation $V_{CC} = 10 \text{ V}, I_B = 0, I_{C(on)} = 2 \text{ mA}, R_L = 100 \Omega$ . See Test Circuit A of Figure 1	2	$\mu s$
$t_f$ Fall Time	Photodiode Operation $V_{CC} = 10 \text{ V}, I_E = 0, I_{C(off)} = 20 \mu A, R_L = 1 \text{ k}\Omega$ . See Test Circuit B of Figure 1	1	$\mu s$

**PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION**

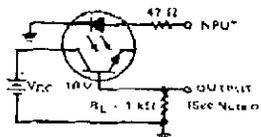
Adjust amplitude of input pulse for  $I_{C(on)} = 2 \text{ mA}$  (Test Circuit A) or  $I_{C(off)} = 20 \mu A$  (Test Circuit B)



TEST CIRCUIT A  
PHOTOTRANSISTOR OPERATION



VOLTAGE WAVEFORMS



TEST CIRCUIT B  
PHOTODIODE OPERATION

- NOTES: a. The input waveform is supplied by a generator with the following characteristics:  $Z_{out} = 50 \Omega, f_r < 15 \text{ ns}$ , duty cycle = 1%  $t_w = 100 \mu s$   
 b. The output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics:  $t_r < 12 \text{ ns}, R_{in} = 1 \text{ M}\Omega, C_{in} = 20 \text{ pF}$

FIGURE 1 - SWITCHING TIMES

**IMPORTANT NOTICE**

Texas Instruments (TI) reserves the right to make changes to its products or to discontinue any semiconductor product or service without notice, and advises its customers to obtain the latest version of relevant information to verify before placing orders, that the information being relied on is current.

TI warrants performance of its semiconductor products and related software to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

Certain applications using semiconductor products may involve potential risks of death, personal injury, or severe property or environmental damage ("Critical Applications").

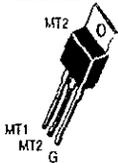
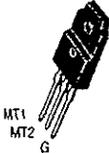
TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, INTENDED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT APPLICATIONS, DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS.

Inclusion of TI products in such applications is understood to be fully at the risk of the customer. Use of TI products in such applications requires the written approval of an appropriate TI officer. Questions concerning potential risk applications should be directed to TI through a local SC sales office.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards should be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance, customer product design, software performance, or infringement of patents or services described herein. Nor does TI warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used.

Table 2. TRIACs

On-State (RMS) Current							V <sub>ORM</sub> (Volts)		
12 AMPS			15 AMPS						
T <sub>C</sub> = 80°C			T <sub>C</sub> = 70°C	T <sub>C</sub> = 90°C	T <sub>C</sub> = 80°C	T <sub>C</sub> = 90°C			
									
			Sensitive Gate		High Performance		Isolated $\mathcal{Q}$		
Case# 221A-04 TO-220AB Style 4	Case# 221A-06 TO-220AB Style 4			Case 221A-04 TO-220AB Style 4	Case 221A-06 TO-220AB Style 4	Case# 221C-02 Style 3			
2N6346A				MAC15A4		MAC15A4FP	200		
2N6347A	<i>MAC12D</i>	<i>MAC15D</i>	<i>MAC15SD</i>	MAC15A6	<i>MAC16D</i>	MAC15A6FP	400		
2N6348A	<i>MAC12M</i>	<i>MAC15M</i>	<i>MAC15SM</i>	MAC15A8	<i>MAC15M</i>	MAC15A8FP	600		
2N6349A	<i>MAC12N</i>	<i>MAC15N</i>	<i>MAC15SN</i>	MAC15A10	<i>MAC16N</i>	MAC15A10FP	800		
Maximum Electrical Characteristics									
120		150		120		150		I <sub>TSM</sub> (Amps)	
				Min.	Max.			I <sub>GT</sub> @ 25°C (mA)	
50	35	0.8	5.0	50	50	50	50	MT2(+) <i>G</i> (+)	
75	35	0.8	5.0	50	50	50	50	MT2(+) <i>G</i> (-)	
50	35	0.8	5.0	50	50	50	50	MT2(-) <i>G</i> (-)	
75	—	—	—	75(1)	—	75(1)	75(1)	MT2(-) <i>G</i> (+)	
				0.45	1.5	2	1.5	2	V <sub>GT</sub> @ 25°C (V)
2	1.5	0.45	1.5	2	1.5	2	2	MT2(+) <i>G</i> (+)	
2.5	1.5	0.45	1.5	2	1.5	2	2	MT2(+) <i>G</i> (-)	
2	1.5	0.45	1.5	2	1.5	2	2	MT2(-) <i>G</i> (-)	
2.5	—	—	—	2.5(1)	—	2.5(1)	2.5(1)	MT2(-) <i>G</i> (+)	
		Min	Min			Min			
		250	250	25		500		DV/DT V/μsec	
-40 to +125			-40 to +110		-40 to +125			T <sub>J</sub> Operating Range (°C)	

$\mathcal{Q}$  Indicates UL Recognized — File #E69369

Devices listed in bold, italic are Motorola preferred devices



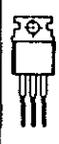
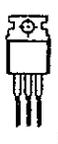
# TRIACS

VRRM DC or Peak Volts	IT RMS Max Forward Current (Amps)											
	0.8 A	2.5 A		4 A		8 A		10 A				
50				ECG5601					ECG5612	ECG5622	ECG5631	
100		ECG5640	ECG5650	ECG5602					ECG5613	ECG5623	ECG5632	
200	ECG5656	ECG5641	ECG5651	ECG5603					ECG5614	ECG5624	ECG5633	
400	ECG5658	ECG5642	ECG5652	ECG5606	ECG5629	ECG5608	ECG5638	ECG5618	ECG5628	ECG5636		
600	ECG5657	ECG5643	ECG5653	ECG5607				ECG5619	ECG5629	ECG5637	ECG5645	
800						ECG5610						
IGT Min (mA) Quadrants I & II	5.0	25	3.0	30	3.0	10	10	50	60	50	60	
IGT Min (mA) Quadrants III & IV	5.0	40	3.0	---	3.0	10	10	75	---	50*	75	
VGT Max (V)	2.0	2.2	2.2	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5	2.5	
ISurge Max (A)	8.0	25	25	30	40	80	80	100	100	100	120	
IHold Min (mA)	20	35	5.0	30	5.0	15	10	50	60	50	60	
Von Max (V)	1.5	1.8	2.2	2.0	1.8	1.5	1.6	1.8	1.8	1.85	1.8	
VGM (V)	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±5.0	±10	±5.0	±5.0	±5.0	±10	±5.0	
PG Av (W)	.01	.05	.05	.5	.3	.5	.4	.5	.5	.5	.5	
Operating Temperature T <sub>J</sub> °C	-40 to +110	-85 to +100	-40 to +90	-40 to +110	-40 to +110	-40 to +110	-40 to +110	-85 to +100	-40 to +100	-40 to +100	-40 to +110	
Off State dv/dt (Typ) V/μsec	20	100	5	5	10	25	25	5	5	50	60	
Operating Quadrants	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,III	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,III	I,II,III	I,II,III,IV	
Fig No.	Z36	Z61	Z38	Z40	Z41	Z41	Z41	Z39	Z41	Z41	Z41	
Package	TO-92	TO-5	TO-18	TO-202	TO-220	TO-220 Isolated Tab	TO-127	TO-220	TO-220 Isolated Tab	TO-220	TO-220 Isolated Tab	

\* 3 Mode device not specified in Quadrant IV

Package Outlines - See Page 1-114

**TRIACS (cont'd)**

VRRM DC or Peak Volts	IT RMS Max Forward Current (Amps)												
	12 A		15 A			25 A				40 A			
30								ECG5681					
300								ECG5682					
300			ECG5673	ECG56004		ECG56015	ECG56019	ECG5683		ECG5693	ECG56022		ECG5688
300			ECG5675	ECG56006		ECG56018	ECG56020	ECG5685		ECG5696	ECG56024		ECG5689
300	ECG5687A	ECG5677	ECG56008	ECG5649	ECG56017			ECG5687	ECG5672	ECG5697	ECG56028	ECG5679	ECG5690
300	ECG5688A		ECG56010		ECG56018								
3000	ECG5686A												
I <sub>GT</sub> Min (mA) Quadrants I & III	100	50	40	50	50 Quads I,II,III	50	75	80	50	50	50	50	50
I <sub>GT</sub> Min (mA) Quadrants II & IV	100	80	75	75	75 Quad IV	50	100	100*	80	80	60*	80	
V <sub>GT</sub> Max (V)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.5	3.0	2.5	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5
I <sub>Surge</sub> Max (A)	120	100	150	150	250	200	225	250	300	300	300	300	300
I <sub>Hold</sub> Min (mA)	100	75	40	70	50	70	75	80	60	60	75	60	
V <sub>on</sub> Max (V)	2.2	1.8	1.6	1.6	1.85	1.8	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	
V <sub>GM</sub> (V)	—	± 5.0	± 10	± 5.0	± 10	± 10	± 5.0	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10
P <sub>G Av</sub> (W)	1	5	.5	5	.5	.5	.75	.8	.75	.75	.8	.75	.75
Operating Temperature T <sub>J</sub> °C	-40 to +125	-65 to +100	-40 to +125	-40 to +100	-40 to +125	-40 to +110	-40 to +100	-40 to +110	-65 to +110	-65 to +110	-40 to +110	-40 +110	
Off State dv/dt (Typ) V/µsec	100	100	50	60	40	60	100	60	100	100	60	100	
Operating Quadrants	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III	I,II,III,IV	I,II,III	I,II,III,IV	I,II,III,IV	I,II,III	I,II,III,IV	I,II,III,IV
Pkg No	Z48A	Z49	Z41	Z50	Z41	Z41	Z49	Z59	Z49	Z50	Z63	Z62	
Package	TO-64 Metric 	TO-48 	TO-220 	5/8" Swedge TO-3 (Isolated Flange) 	TO-220 	TO-220 Isolated Tab 	TO-48 	3/4" Swedge TO-3 (Isolated Flange) 	TO-48 	TO-48 Isolated Stud 	Square Pak TO-3 (Isolated Flange) 	1/2" Press Fit 	

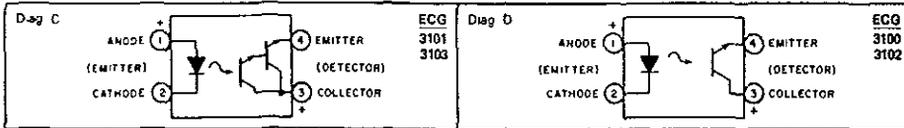
\* 3 Mode device not specified in Quadrant IV

Package Outlines - See Page 1-114

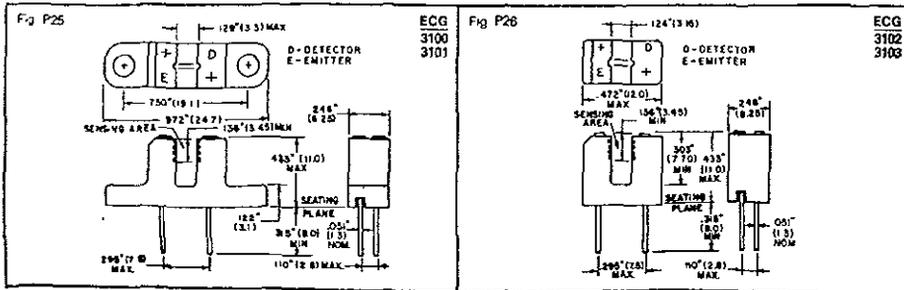
## Opto-Coupled Interrupter Modules

ECG Type	Output Configuration	Total Power Dissipation P <sub>L</sub> (mW)	LED Max Ratings		Collector To Emitter Voltage BVCEO (V)	Collector Current I <sub>C</sub> (mA)	Ckt. Diagram	Fig No
			Forward Current I <sub>F</sub> (mA)	Reverse Voltage V <sub>R</sub> (V)				
ECG3100	NPN Transistor	250	60	6	55	100	D	P25
ECG3101	NPN Darlington	250	60	6	55	100	C	P25
ECG3102	NPN Transistor	250	60	6	55	100	D	P26
ECG3103	NPN Darlington	250	60	6	55	100	C	P26

### Circuits



### Outlines



ECG Type	Output Configuration	Total Device Ratings		LED Max Ratings		Photothyristor Ratings					Ckt. Diag	Fig. No
		Isolation Voltage Surge (V)	Power P <sub>T</sub> (mW)	Forward Current I <sub>F</sub> (mA)	Reverse Voltage V <sub>R</sub> (V)	V <sub>DRM</sub> (V)	I <sub>T</sub> RMS (mA)	I <sub>FT</sub> (mA)	V <sub>F</sub> (on) (V) 100 mA	I <sub>HOLD</sub> (mA)		
ECG3046	SCR	3650	280	60	3	400	100	14	1.3	5	G	P28
ECG3047	TRIAC	7500	330	50	3	250	100	10	3.0	.1	H	
ECG3048	TRIAC	7500	330	60	3	400	100	10	3.0	.1	H	
ECG3049	TRIAC with Zero Crossing Circuit	7500	330	50	3	250	100	15	3.0	.1	J	
ECG3091	SCR	4000	400	60	6	400	300	11	1.3 at 300 mA	.5	G	
ECG3097	TRIAC with Zero Crossing Circuit	7500	300	50	6	400	100	15	3.0	2	J	

---

## Conclusiones

---

El desarrollo de esta tesis se basa en un problema existente, que consiste en controlar la temperatura de un horno, utilizado para las pruebas estáticas, en donde se introduce una unidad automotriz terminada, se le aplica una temperatura uniforme verificando de esta forma que las partes que conforman el automóvil, funcionen correctamente y además no sufran daños, ni merme su calidad y firmeza debido a la temperatura a la que son expuestas.

En la actualidad este trabajo se lleva a cabo por medio de un dimmer que controla la intensidad luminosa de los focos empleados para elevar la temperatura dentro del horno, según los encargados de planta este sistema tiene varias desventajas como son:

1. Requiere de un operario que vigile en todo momento la temperatura en el interior del horno y controle por medio de un mando manual la intensidad luminosa de los focos.
2. Requiere de un termómetro que muestre la temperatura, pero no se puede saber con exactitud si el operario, leyó adecuadamente las lecturas.
3. Requiere de mantenimiento muy a menudo para conservar en un buen punto de calibración el instrumento.
4. Los fabricantes tienen problemas, debido a que creen que sus partes no son evaluadas bajo los mismos parámetros.
5. El costo es elevado, y se tiene que importar puesto que no está disponible en el mercado nacional.

Todos estos problemas fueron resueltos en su totalidad de la siguiente forma:

1. Nuestro controlador no requiere de un operario dedicado, puesto que el control es de malla cerrada y por lo tanto se autoregula basándose en el error generado.
2. Requiere de un sensor de temperatura, pero la lectura se muestra en un display de cristal líquido, que anula el error de paralaje.
3. No requiere de un mantenimiento tan exhaustivo, debido a que el controlador se basa en un microcontrolador y un programa de control y por tanto no sufren de envejecimiento y tolerancias como las partes analógicas del dimmer.
4. Por tener un control con una precisión de  $\pm 1$  °C, todas las pruebas realizadas son evaluadas bajo circunstancias similares.
5. El costo es similar al de un dimmer, pero si tomamos en cuenta que para el control que requiere la industria se necesitan seis dimmers, y este mismo trabajo lo realiza nuestro controlador, además no requiere de un operario de tiempo completo ni de una calibración y mantenimiento continuo, nuestro sistema es mucho más económico que el existente.

Todo esto demuestra que el sistema propuesto es superior al existente, gracias a la combinación de la lógica programable, combinada con algunos componentes analógicos indispensables.

El microcontrolador utilizado es el MC68HC11, cabe hacer la aclaración de que trabajamos con un microcontrolador, y no con un microprocesador, la diferencia radica en que *el microprocesador no se puede comunicar con otros dispositivos externos, es decir, no cuenta con puertos de entrada y salida para datos, punto fundamental y necesario para poder comunicarnos con los dispositivos externos.*

El microcontrolador es una herramienta fundamental en casi todos los proyectos, que antiguamente se desarrollaban únicamente con dispositivos analógicos, lo cual nos trae varias ventajas como son:

- ⊗ Mayor rapidez de respuesta del sistema.
- ⊗ Menor espacio físico.
- ⊗ Menos dispositivos externos.
- ⊗ Mayor exactitud de los cálculos.
- ⊗ Se pueden evitar ciertos transitorios a través de software.

La arquitectura utilizada no es necesaria que se desarrolle, tal cual se presenta en este trabajo, se pueden emplear microcontroladores más sencillos y por tanto más económicos para la fabricación del controlador, como pueden ser los denominados OTP (One Time Programmable), los cuales se pueden programar sólo una vez, la razón por lo cual se utilizó el microcontrolador M68HC11 es por su facilidad para el desarrollo de programas en su *etapa experimental*, además de ser el mismo microcontrolador utilizado para programar en distintas materias de la facultad.

## Bibliografía

---

- ✓ Instrumentación Industrial  
Antonio Creus  
5ª Edición  
Alfaomega Marcombo
  
- ✓ Sensores y Acondicionadores de Sensores  
Ramón Rallás Areny  
2ª Edición  
Marcombo
  
- ✓ Electrónica Teoría de circuitos  
Robert Boylestad  
  
5ª Edición  
Ed Prentice Hall
  
- ✓ Análisis de sistemas dinámicos y control automático.  
Canales Ruiz Roberto  
1ª Edición  
Ed. Limusa
  
- ✓ Enciclopedia Microsoft Encarta 98  
Microsoft Corporation.

Ingeniería de control moderna

Katsuhiko Ogata

Ed. Prentice Hall

✓ La técnica electrónica

Componentes pasivos y semiconductores.

1ª Edición

Nueva Lente.

✓ Instrumentación Industrial

Soisson E. Harold

1ª Edición

Ed. Limusa

✓ Circuitos prácticos de electrónica., Triacs y Tiristores

Fritz Bergrod

3ª Edición

Ed. Marcambo.

✓ Electrónica de potencia

Raymond Ramshaw

Ed. Marcambo

✓ Electrónica de potencia.

Hansrvedi Bühler

Colección Ciencia Electrónica

- ✓ Motorola Thyristor device data  
Pentice-Hall  
E.E.U.U., 1989
  
- ✓ Manual, Texas Instruments  
Dallas Texas, 1984