



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DESARROLLO DE UN CONTROL DE
TEMPERATURA PARA UNA INCUBADORA
USADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

EDUARDO VALDEZ ROMERO

DIRECTOR DE TESIS:

ING. RODOLFO PETERS LAMMEL



CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO 2012



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.

DEDICATORIAS

A MI MADRE: TERESA ROMERO VÁZQUEZ

Por todo su cariño, su cuidado, su protección, sus enseñanzas, sus consejos, porque gracias a ella soy lo que soy y porque sé que estará a mi lado apoyándome en todo momento.

A MIS HERMANOS: MAYOLO LIMÓN ROMERO, GREGORIA LIMÓN ROMERO, CLAUDIA LIMÓN ROMERO Y BEATRIZ LIMÓN ROMERO

Por su apoyo incondicional, por sus consejos, su confianza, por sus ánimos, por su comprensión, por esos buenos momentos que me han hecho pasar y sobre todo por que siempre han estado junto a mí cuando más los he necesitado.

A LA MEMORIA DE MI HERMANA BEATRIZ LIMÓN ROMERO

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema 3

1.2 Objetivo 3

1.3 Metodología 3

CAPÍTULO 2: DISPOSITIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA 5

2.1 Termómetro de mercurio 6

2.2 Termorresistencia 6

2.3 Termopar 7

2.4 Termistor 8

2.5 Integrado lineal 9

2.6 Termómetro de gas 10

2.7 Termómetro de diodos 11

CAPÍTULO 3: DISPOSITIVOS DE ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN EL CONTROL DE TEMPERATURA 12

3.1 Resistores 12

3.2 Capacitores 13

3.3 Inductores 14

3.4 Reguladores de tensión 16

3.4.1 Reguladores integrados lineales 17

3.4.1.1 Regulador de voltaje 78XX 17

| | |
|--|-----------|
| 3.5 Dispositivos de control de potencia | 18 |
| 3.5.1 Relevadores | 18 |
| 3.5.2 Dispositivos de estado sólido | 24 |
| 6.1.1.1 Diodos semiconductores | 26 |
| 6.1.1.2 Transistores | 33 |
| 6.1.1.3 Tiristores | 40 |
| 6.1.1.4 Celda Peltier | 43 |
| | |
| CAPÍTULO 4: AMPLIFICADOR OPERACIONAL | 45 |
| | |
| 4.1 Topologías básicas del amplificador operacional | 48 |
| 4.1.1 Seguidor de tensión | 48 |
| 4.1.2 Amplificador inversor | 49 |
| 4.1.3 Amplificador no inversor | 49 |
| 4.1.4 Amplificador sumador inversor | 50 |
| 4.1.5 Amplificador diferencial | 50 |
| 4.1.6 Amplificador integrador ideal | 51 |
| 4.1.7 Amplificador derivador ideal | 52 |
| | |
| 4.2 Circuitos comparadores | 52 |
| 4.2.1 Comparador de voltaje básico | 53 |
| 4.2.2 Comparadores de ventana | 56 |
| | |
| CAPÍTULO 5: CONTROLADORES | 58 |
| | |
| 5.1 Microcontroladores | 58 |
| 5.2 Los microcontroladores PIC | 60 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 5.2.1 | Los microcontroladores de arquitectura cerrada | 62 |
| 5.2.2 | Los microcontroladores de arquitectura abierta | 63 |
| CAPÍTULO 6: DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA | | 67 |
| 6.1 | Sistemas de control | 67 |
| 6.1.1 | Clasificación de los sistemas de control | 67 |
| 6.1.1.1 | Sistemas de control de lazo cerrado | 68 |
| 6.1.1.2 | Sistemas de control de lazo abierto | 68 |
| 6.1.2 | La Ingeniería en los sistemas de control | 69 |
| 6.1.3 | Acciones básicas de control | 70 |
| 6.2 | Fuente de alimentación | 73 |
| 6.2.1 | Reducción de tensión | 75 |
| 6.2.2 | Rectificación y filtrado | 77 |
| 6.2.3 | Regulación | 80 |
| 6.3 | Circuito de sensado de temperatura y nivel de referencia | 81 |
| 6.3.1 | Sensado de temperatura | 81 |
| 6.3.2 | Circuito de nivel de tensión de referencia | 83 |
| 6.4 | Etapas de comparación | 85 |
| 6.5 | Etapas de potencia | 87 |
| PRUEBAS | | 92 |
| CONCLUSIONES | | 95 |
| ANEXO | | 96 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 98 |

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 2-1. Características de algunos tipos de termómetros.

Tabla 2-2. Tabla comparativa entre los diferentes materiales con los que se construyen las termoresistencias.

Tabla 2-3. Comparación entre los tipos más comunes de termopares.

Tabla 4-1. Comparación entre las principales características de los amplificadores operacionales ideales y reales.

Tabla 5-1. Características de algunos tipos de PIC's de la Gama Mini.

Tabla 5-2. Características de algunos PIC's del grupo de la Gama Baja.

Tabla 5-3. Tabla comparativa entre algunos PIC's de la Gama Media.

Tabla 5-4. Características de algunos PIC's integrantes de la Gama Alta.

Tabla 6-1. Características principales del PIC16F876A.

Figura 2-1. Termómetro de mercurio.

Figura 2-2. Partes de una termoresistencia.

Figura 2-3. Partes que conforman a un termopar.

Figura 2-4. Algunos tipos comunes de termistores.

Figura 2-5. Algunos tipos de integrados lineales que se utilizan como sensores.

Figura 2-6. Diagrama de un termómetro de gas.

Figura 2-7. Diodo 1N4148 comúnmente utilizado como sensor de temperatura.

Figura 3-1. Símbolos más comunes para representar a los resistores y a los potenciómetros.

Figura 3-2. Resistores fijos y variables empleados comúnmente.

Figura 3-3. Símbolos más comunes para representar a los capacitores fijos y variables.

Figura 3-4. Tipos de capacitores fijos y variables comúnmente utilizados.

Figura 3-5. Símbolos más comunes para representar a los inductores.

Figura 3-6. Algunos tipos de inductores.

Figura 3-7. Esquema de conexión típica del circuito integrado 78XX.

Figura 3-8. Diagrama de bloques que conforman a un relevador.

Figura 3-9. Símbolo común para representar a un interruptor de polo sencillo, interruptor sencillo.

Figura 3-10. Símbolo común para representar a un interruptor de polo sencillo, interruptor doble.

Figura 3-11. Símbolo común para representar a un interruptor de polo doble, interruptor sencillo.

Figura 3-12. Símbolo común para representar a un interruptor de polo doble, interruptor doble.

Figura 3-13. Relevadores polarizados comunes.

Figura 3-14. Partes de un relevador tipo armadura.

Figura 3-15. Diagrama de un relevador de núcleo móvil.

Figura 3-16. Partes de un relevador tipo reed.

Figura 3-17. Algunos tipos de relevadores de estado sólido.

Figura 3-18. Vista frontal de un relevador de láminas.

Figura 3-19. Típico relevador de corriente alterna.

Figura 3-20. Cristales de material tipo N y de tipo P.

Figura 3-21. Flujo de corriente de las cargas negativas libres de un cristal de Silicio tipo N.

Figura 3-22. Flujo de corriente en un cristal de material tipo P.

Figura 3-23. Flujo de corriente en un diodo semiconductor.

Figura 3-24. Símbolo (a) y algunos tipos de diodos rectificadores (b).

Figura 3-25. Símbolo del diodo zener (a) y su imagen real (b).

Figura 3-26. Símbolo (a) y algunos tipos de fotodiodos (b),
Figura 3-27. Símbolo (a) y algunos tipos de diodos emisores de luz (b).
Figura 3-28. Símbolo del diodo láser (a) y su imagen real (b).
Figura 3-29. Símbolo del diodo Schottky (a) y su imagen real (b).
Figura 3-30. Símbolos de los transistores.
Figura 3-31. Encapsulados más comunes de los transistores.
Figura 3-32. Símbolos esquemáticos para los JFET's de canal N y de canal P.
Figura 3-33. Símbolos del Mosfet.
Figura 3-34. Símbolo común para representar al fototransistor.
Figura 3-35. Imagen real de un fototransistor.
Figura 3-36. Símbolo y estructura del SCR.
Figura 3-37. Imagen real de un SCR de baja corriente.
Figura 3-38. SCR de media corriente.
Figura 3-39. SCR común de alta corriente.
Figura 3-40. Símbolo del TRIAC.
Figura 3-41. Imagen real de un TRIAC de baja corriente.
Figura 3-42. TRIAC común de media corriente.
Figura 3-43. Diagrama en donde se muestra la estructura interna de una celda Peltier.
Figura 3-44. Corte transversal de la celda Peltier en donde se muestran los elementos semiconductores y las aletas disipadoras.
Figura 3-45. Algunos tipos de módulos Peltier.

Figura 4-1. Etapas de la estructura interna de un amplificador operacional.
Figura 4-2. Símbolo del circuito que representa a un amplificador operacional de propósito general.
Figura 4-3. Encapsulados más comunes de los amplificadores operacionales.
Figura 4-4. Símbolo del amplificador seguidor y su gráfica.
Figura 4-5. Símbolo y gráfica del amplificador inversor.
Figura 4-6. Símbolo y gráfica del amplificador operacional en configuración no inversor.
Figura 4-7. Símbolo del amplificador sumador y su gráfica.
Figura 4-8. Símbolo del amplificador diferencial y su gráfica en donde se observa que la señal de salida V_o , es la diferencia de las entradas V_1 y V_2 .
Figura 4-9. Símbolo del amplificador integrador y gráfica en la que se observa que la señal de salida V_o , es la forma de onda que corresponde a la integral de la señal cuadrada de la entrada.
Figura 4-10. Símbolo del amplificador derivador en cuya gráfica se observa que la señal de salida V_o , corresponde a un función coseno, que es la derivada de la señal senoidal de la entrada V_i .
Figura 4-11. El comparador inversor y su gráfica.
Figura 4-12. El comparador no inversor y su gráfica.
Figura 4-13. Disparos en falso debidos a la presencia de ruido en la respuesta del comparador.
Figura 4-14. Símbolo y características entrada-salida de un comparador de histéresis.
Figura 4-15. Configuración y gráfica del comparador inversor Schmitt Trigger.
Figura 4-16. Configuración y gráfica del comparador no inversor Schmitt Trigger.
Figura 4-17. Comparador de ventana inversor y gráfica en la cual se observa que la salida está en nivel bajo cuando la entrada se encuentra en los límites de la ventana.
Figura 4-18. Comparador de ventana no inversor y gráfica en la cual se observa que la salida está en un nivel alto cuando la señal de entrada está dentro de los límites de la ventana.

Figura 5-1. Arquitectura Harvard.

Figura 5-2. Equivalencia de un ciclo de instrucción a cuatro ciclos de reloj.

Figura 6-1. Sistema de control de lazo abierto.
Figura 6-2. Sistema de control de lazo cerrado.
Figura 6-3. Diagrama de bloques del control de temperatura.
Figura 6-4. Fuente de alimentación tipo ATX.
Figura 6-5. Partes que conforman a una fuente ATX.
Figura 6-6. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación.
Figura 6-7. Circuito y gráfica de las señales de entrada y salida en la reducción de tensión.
Figura 6-8. Circuito rectificador.
Figura 6-9. Gráfica de la señal de salida rectificada.
Figura 6-10. Circuito de filtrado y gráfica de la señal de salida filtrada.
Figura 6-11. Circuito final de la fuente de alimentación con salida regulada.
Figura 6-12. Gráfica de la señal de salida regulada.
Figura 6-13. Configuración básica e imagen real del sensor LM35 en su encapsulado T0-92.
Figura 6-14. Circuito de sensado de temperatura.
Figura 6-15. Esquema del divisor de tensión variable.
Figura 6-16. Circuito de nivel de tensión de referencia.
Figura 6-17. Diagrama de flujo de la etapa de comparación realizada por el microcontrolador PIC.
Figura 6-18. Circuito de sensado, nivel de referencia y microcontrolador PIC.
Figura 6-19. Circuito de conmutación para una carga resistiva.
Figura 6-20. Circuito de conmutación para una carga inductiva (motor).
Figura 6-21. Circuito para la conmutación de la celda Peltier.
Figura 6-22. Circuito final para la conmutación de la celda Peltier.
Figura 6-23. Circuito completo del control de temperatura.

Figura P-A. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 16[°C].
Figura P-B. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 20[°C].
Figura P-C. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 25[°C].
Figura P-D. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 30[°C].
Figura P-E. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 33[°C].

Figura A-1. Circuito de control.
Figura A-2. Vista lateral interna del módulo de control.
Figura A-3. Vista posterior del módulo de control.
Figura A-4. Vista frontal del módulo de control.
Figura A-5. Vista del interior del equipo de refrigeración.
Figura A-6. Vista frontal del equipo de refrigeración con módulo de control.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Ambiental es la aplicación de técnicas bien fundamentadas para la solución de problemas de saneamiento ambiental para llevar a cabo una mejora en el control de la contaminación del agua, suelo y atmósfera, así como del impacto social y ambiental de esas soluciones.

El objetivo de la Ingeniería Ambiental es utilizar los conocimientos de las ciencias naturales y humanas en la previsión y solución de las dificultades emergentes de la acción del hombre sobre su ambiente, también contempla la restauración y limpieza de los ecosistemas que han sido afectados de manera importante por uno o varios contaminantes y el desarrollo de tecnología menos contaminante, tanto de procesos industriales como de fuentes alternas de energía más limpias y seguras. En general, en esta disciplina se usan todas las herramientas tecnológicas disponibles para diseñar dispositivos de tratamiento y control de la contaminación.

En la actualidad tanto en México como en el resto del mundo se sufre un problema de contaminación ambiental que ha llegado a niveles realmente preocupantes y que sigue aumentando por el acelerado crecimiento demográfico y el constante desarrollo industrial.

La contaminación ambiental se manifiesta principalmente en:

- contaminación atmosférica
- contaminación del agua
- contaminación del suelo

La contaminación atmosférica se produce por la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza¹.

La contaminación del agua se produce por la incorporación de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos posteriores o sus servicios ambientales.

La contaminación del suelo es la incorporación de basura, desechos tóxicos, productos químicos y desechos industriales. Este tipo de contaminación produce un desequilibrio físico químico y biológico que afectan negativamente las plantas, animales y humanos.

Los efectos de la contaminación se manifiestan por las alteraciones en los ecosistemas, en la generación de enfermedades en los seres vivos, muerte masiva y en casos extremos la desaparición de especies animales y vegetales, y en general la degradación de la calidad de vida.

Los contaminantes se dividen en tres grandes tipos: químicos, biológicos y físicos

¹ *Contaminación atmosférica*. Ernesto Martínez Ataz y Yolanda Díaz de Mera Morales. Universidad de Castilla-La Mancha. 2004, pág. 13

- Los contaminantes químicos son aquellos que alteran la composición del agua y/o reaccionan con ella.
- Los contaminantes físicos son los que no reaccionan con el agua, pero pueden dañar la vida en el ecosistema.
- Los contaminantes biológicos son organismos o microorganismos, que son dañinos o que se encuentran en exceso (plagas, como los lirios acuáticos, de rápida propagación).

La naturaleza procesa la contaminación mediante procesos cíclicos (geoquímicos), pero actualmente le resultan insuficientes para procesar tanto la contaminación que es generada por las actividades del hombre como la propia.

Los contaminantes biodegradables pueden ser degradados mediante procesos naturales o en sistemas de tratamientos hechos por el hombre, en los que acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica con microorganismos. Sin embargo, los suelos contaminados suelen tener una actividad microbiana baja, básicamente debido a la falta de condiciones ambientales favorables, como la baja concentración de materia orgánica, oxígeno, nitrógeno y/o fósforo.

Los microorganismos degradadores presentes en suelos altamente contaminados suelen desarrollar mecanismos reguladores genéticos que responden a la presencia o ausencia de determinados compuestos contaminantes, teniendo muchos de ellos la capacidad de utilizar los propios contaminantes como fuente de carbono.

En los últimos años se han desarrollado tecnologías alternativas para el estudio y tratamiento de los ecosistemas contaminados. Dentro de estas tecnologías se encuentra el uso de las propiedades catalíticas de organismos vivos para producir una aceleración del proceso natural de biodegradación y eliminar contaminantes de los ecosistemas.

Para efectuar el estudio de los microorganismos se han diseñado diversos métodos que permiten cultivarlos bajo condiciones de laboratorio controladas. Estos métodos consisten en mantener los microorganismos bajo parámetros controlados de temperatura, humedad, oxigenación, así como requisitos específicos de nutrientes.

La incubadora es un equipo con funciones específicas que permite controlar, según su diseño, temperatura y humedad para crear un ambiente adecuado apto para la reproducción y desarrollo de organismos vivos. Algunas de las aplicaciones más comunes son los cultivos microbiológicos, micológicos y virales, entre otros.

Las incubadoras de laboratorio pueden ser diseñadas acordes con las aplicaciones que se pretendan realizar en el laboratorio, de esto depende su sencillez o complejidad.

1.1 Planteamiento del problema

En el área de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM se requiere de una incubadora de microorganismos degradadores de la materia orgánica para así poder cultivarlos y estudiarlos de acuerdo con las necesidades de los usuarios.

Debido al elevado costo de los diversos equipos de incubación, se planteó la idea de poder modificar algunas características de un equipo de refrigeración de 7 pies cúbicos con el que cuenta actualmente el Instituto, para que éste pueda funcionar como incubadora y de esta manera poder reducir significativamente la inversión en el equipo.

1.2 Objetivo

Con base en el problema planteado, se tiene como objetivo desarrollar un control de temperatura, modificando la tecnología de funcionamiento de un equipo de refrigeración para que éste pueda mantener la temperatura en el interior con la menor oscilación posible. Las características principales de este proyecto son las siguientes:

- El equipo debe de poder controlar la temperatura en el rango de los 15[°C] a los 40[°C], particularmente se busca mantener en el interior del equipo una temperatura constante de 20[°C] con una oscilación no mayor a los 0.5[°C].
- El usuario podrá ajustar la temperatura a la cual requiera que trabaje el equipo.
- Se podrá visualizar la temperatura que se tenga en el interior del equipo.
- Se busca que el costo final sea menor al de los equipos que se encuentran en el mercado.

1.3 Metodología

De acuerdo con pruebas que se realizaron con el equipo de refrigeración, se encontró que ajustando su control termostático para que activara o desactivara el compresor de acuerdo con un parámetro prefijado en el control de temperatura, el sistema presentaba un sobrepaso de aproximadamente 1.7[°C].

Por lo anterior se planteó en utilizar al compresor cuando se necesite disminuir temperaturas que se encuentren muy por arriba de la temperatura de ajuste y para los cambios pequeños se activará un dispositivo que permita enfriar y que pueda ser conmutado de manera constante, para lo cual se pensó en utilizar una celda Peltier que es un dispositivo semiconductor capaz de enfriar y calentar de acuerdo con la polaridad que se le aplique en sus terminales. Así mismo para cuando se requiera elevar la temperatura se activará una resistencia plana, que es uno de los dispositivos de calentamiento usados comúnmente en algunas incubadoras y hornos de secado.

En el interior del equipo se encontrará un sensor de temperatura cuya señal al igual que la de la temperatura de referencia, serán enviadas de forma analógica a una unidad de control que se encargará de comparar y procesar dichas señales y de acuerdo con los parámetros recibidos, se activarán los diferentes dispositivos que entrarán en funcionamiento.

De acuerdo con lo anterior se establecerán dos límites, uno superior, que se fijará un grado celsius arriba de la temperatura de ajuste, y uno inferior con un valor de un grado celsius por debajo del valor de ajuste, de esta manera, cuando la temperatura en el interior del equipo se encuentre por arriba del límite superior, se activará el compresor comenzando así el proceso de enfriamiento, así mismo cuando se tenga un nivel de temperatura por debajo de este límite, la celda Peltier y la resistencia de calentamiento se encontrarán conmutando continuamente y de esta manera mantener la temperatura deseada dentro del equipo.

El proceso de comparación entre las dos señales y de activar los elementos de calentamiento y de enfriamiento, será llevado a cabo por un microcontrolador capaz de poder recibir entradas analógicas y de procesarlas para obtener salidas en forma digital que faciliten la integración de los elementos de conmutación con la unidad de control.

Así pues para la fabricación del dispositivo de control, será necesario conocer los distintos elementos y dispositivos que van a intervenir en su funcionamiento y de esta manera poder obtener resultados favorables.

CAPÍTULO 2: DISPOSITIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA

La temperatura es aquella propiedad o magnitud física que está relacionada con la actividad molecular que presenta el cuerpo de un organismo, un objeto o una región determinada. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura).

La temperatura se mide de acuerdo con las escalas térmicas consideradas: Celsius, Fahrenheit, absoluta (Kelvin), Réaumur y Rankine.

Para diseñar un instrumento que mida la temperatura debemos escoger una cualidad de la materia que sea fácilmente observable, que varíe de manera importante con la agitación de sus partículas, que sea fácil de medir y que nos permita relacionar su variación con la agitación que tiene el cuerpo.

Existen numerosos tipos de sensores de temperatura o termómetros que, de acuerdo con la aplicación específica, pueden ser los más adecuados. A continuación se muestran algunos tipos de termómetros y sensores de temperatura usuales junto a algunas de sus características más notables.

| Tipo de termómetro | Intervalo de trabajo [°C] | Costo | Linealidad | Características |
|---|---------------------------|-------|------------|--|
| Termómetro de mercurio | -35 a 280 | Bajo | Buena | Simple, lento y de lectura manual |
| Termorresistencia RTD (Resistance Temperature Detector) | -200 a 950 | Medio | Alta | Exactitud |
| Termopar | -250 a 1400 | Bajo | No lineal | Limitantes en exactitud |
| Termistor | -50 a 300 | Medio | No lineal | Muy sensible |
| Integrado lineal | -50 a 150 | Bajo | Muy alta | Fácil conexión a sistemas de toma de datos |
| Gas | -30 a 1500 | Medio | Buena | No muy versátil |
| Diodos | -70 a 50 | Bajo | Alta | Bajo costo |

Tabla 2-1. Características de algunos tipos de termómetros.

2.1 Termómetro de mercurio

El termómetro de mercurio está 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 se puede leer en una escala situada junto al capilar. El termómetro de mercurio es muy utilizado para medir temperaturas ordinarias; también se emplean otros líquidos como alcohol o éter. Se utiliza el mercurio para construir termómetros porque es un metal que es líquido entre $-35[^\circ\text{C}]$ y $280[^\circ\text{C}]$ y porque se dilata mucho.



Figura 2-1. Termómetro de mercurio.

2.2 Termorresistencia

La termorresistencia es una resistencia fabricada con óxidos de diferentes materiales (cromo, cobalto, hierro, etc.).

Medir la temperatura con termorresistencias, se basa en la característica que tienen todos los materiales de cambiar su resistencia según la temperatura, los metales suelen aumentar su resistividad eléctrica al aumentar la temperatura a que están sometidos, esta variación se llama coeficiente de temperatura. En la gama de conductores metálicos, son los metales puros los que tienen las variaciones más fuertes de resistencia. Las termorresistencias se suelen fabricar con níquel (Ni) y platino (Pt).

Las termorresistencias más comunes se fabrican de alambres finos soportados por un material aislante y encapsulado. El elemento encapsulado se inserta dentro de una vaina o tubo metálico cerrado en un extremo que se llena con un polvo aislante y se sella con cemento para impedir que absorba humedad.

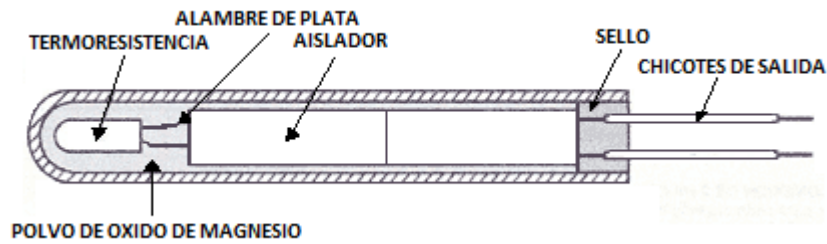


Figura 2-2. Partes de una termorresistencia.

También se construyen termorresistencias de cobre, con calidad menor y más baratas, fabricadas sobre soportes planos de cerámica o polímeros (flexibles). En general, las ventajas de todas estas termorresistencias se concentran en la precisión y la linealidad, y las desventajas radican en el costo alto, el valor reducido de la resistencia total, la poca variación de esa resistencia con la temperatura, el autocalentamiento y la necesidad de agregar convertidores finos de resistencia a voltaje o corriente.

La siguiente tabla permite hacer algunas comparaciones:

| MATERIAL | COBRE | NIQUEL | PLATINO |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Intervalo en [°C] | [-200 - 220] | [-150 - 300] | [-200 - 250] |
| Precisión [°C] | 0.1 | 0.5 | 0.01 |
| Linealidad | Buena | Baja | Alta |
| Velocidad | Alta | Alta | Baja |
| Sensibilidad | Alta | Alta | Alta |

Tabla 2-2. Tabla comparativa entre los diferentes materiales con los que se construyen las termorresistencias.

2.3 Termopar

Un termopar se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño entre los extremos de los alambres, (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.

Normalmente los termopares industriales se consiguen encapsulados dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina, en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio).



Figura 2-3. Partes que conforman a un termopar.

Existen una infinidad de tipos de termopares, en la tabla aparecen algunos de los más comunes, pero casi el 90% de los más utilizados son del tipo J o del tipo K.

| Designación | Aleación cable+ | Aleación cable- | Intervalo (Mín, Máx) [°C] | Diferencia de potencial máxima [mV] |
|-------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| J | Hierro | Cobre / Níquel | (-180, 750) | 42.2 |
| K | Níquel / Cromo | Níquel / Aluminio | (-180, 1400) | 54.8 |
| T | Cobre | Cobre / Níquel | (-250, 400) | 20.8 |
| R | 87% Platino 13% Rodio | 100% Platino | (0, 1800) | 21.09 |
| S | 90% Platino 10% Rodio | 100% Platino | (0, 1800) | 18.68 |
| B | 70% Platino 30% Rodio | 94% Platino 6% Rodio | (0, 1850) | 13.8 |

Tabla 2-3. Comparación entre los tipos más comunes de termopares.

2.4 Termistor

Un termistor es un semiconductor que varía el valor de su resistencia eléctrica en función de la temperatura, su nombre proviene de Thermally Sensitive Resistor (resistor sensible a la temperatura en inglés).

El termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un “resistor térmico” con un coeficiente térmico de temperatura negativo de valor muy elevado, habiendo casos especiales de coeficiente positivo, a diferencia de los RTD, los termistores se basan en semiconductores y no en conductores.

Está compuesto de una mezcla sinterizada de óxidos metálicos comprimidos, los metales utilizados son níquel, cobalto, manganeso, hierro, cobre, magnesio y titanio, como típicas se pueden considerar las preparaciones de óxido de manganeso con cobre y óxido de níquel con cobre. Modificando las proporciones de óxido se puede variar la resistencia básica de un termistor; se dispone de termistores con resistencias básicas a 25 [°C] desde unos pocos cientos hasta varios millones de ohm. Se emplean fundamentalmente entre los -50 [°C] y los 150 [°C] no obstante las unidades encapsuladas pueden alcanzar los 300 [°C].

Los termistores tienen mayor sensibilidad a los cambios de temperatura que otros transductores, sirven para la medición o detección de temperatura tanto en gases, como en líquidos o sólidos. A causa de su tamaño pequeño, se les encuentra normalmente montados en sondas o alojamientos especiales que pueden ser diseñados específicamente para posicionarlos y protegerlos adecuadamente en cualquier medio donde se quiera trabajar.

Existen en el mercado termistores con diferentes encapsulados dependiendo de la constitución y el modelo, especificaciones eléctricas y su aplicación final.

Los termistores tipo perla, disco y chip son los más ampliamente utilizados en medición de temperatura. Aunque cada configuración es fabricada siguiendo un método específico, algunas técnicas generales se emplean en la mayoría de termistores: formulación y preparación del óxido metálico, pulverización y mezcla; tratamiento de calor para producir un material cerámico; adición de contactos eléctricos (para discos y chips), y para componentes individuales, encapsulados en un dispositivo con cubierta protectora y terminales.

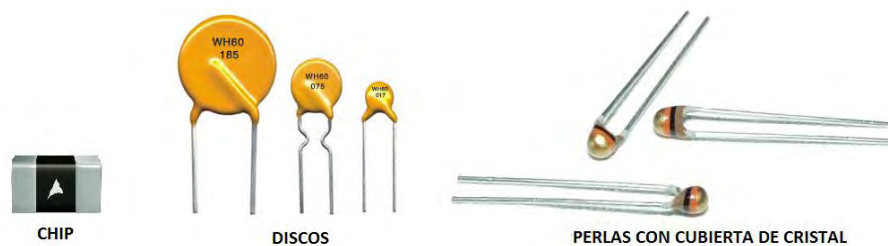


Figura 2-4. Algunos tipos comunes de termistores.

En comparación con los termopares y las termorresistencias, el termistor no ofrece ventajas de exactitud de salida y estabilidad.

2.5 Integrado lineal

Los circuitos integrados lineales son aquellos que admiten para la entrada un intervalo de señales dentro del cual se pueden tomar infinitos valores válidos, al igual que sucede en la salida.

Estos circuitos son muy adecuados para medir temperaturas cuando se usa un sistema de toma de datos conectado en una computadora, por lo general tienen tres terminales: tierra, alimentación y una salida, con alimentaciones en la gama de 5-30[Vdc]. La salida que suministran es proporcional a la temperatura. Estos circuitos producen una señal muy lineal y calibrada, por lo general producen entre 1 y 10 mV/K. Existen integrados con calibraciones para diversos sistemas de unidades. El intervalo de funcionamiento abarca desde -50 a 150 [°C]. A su linealidad se deben añadir como ventajas su

pequeño costo, precisión a temperatura ambiente, su salida de tensión apreciable y el pequeño autocalentamiento. Esto último es consecuencia de su reducido consumo de potencia (75-100[μ W]).



Figura 2-5. Algunos tipos de integrados lineales que se utilizan como sensores.

2.6 Termómetro de gas

Los más sencillos de estos aparatos están constituidos por un depósito lleno de gas y prolongado por un dispositivo manométrico o por un tubo horizontal que contiene un índice, el cual se desplaza según las variaciones de volumen del gas del interior.

El termómetro de gas de volumen constante es muy exacto, y tiene un margen de aplicación extraordinario: desde $-30[^\circ\text{C}]$ hasta $1500[^\circ\text{C}]$. Pero es más complicado, por lo que se utiliza más bien como un instrumento normativo para la graduación de otros termómetros.

Entre todas las coordenadas de estado o propiedades termométricas, la presión de un gas encerrado en un recipiente a volumen constante es notable por su sensibilidad, precisión de medición y reproducibilidad. El gas está contenido en un depósito, y la presión que ejerce puede medirse mediante un manómetro de mercurio abierto. Cuando se eleva la temperatura del gas, éste se expande obligando al mercurio a bajar en el tubo A y a subir en el tubo B, la altura de la columna de mercurio indica la presión del gas, a partir de ella se puede calcular la temperatura. Los tubos A y B están unidos por un tubo de goma. Elevando B, puede hacerse que el nivel del mercurio en A vuelva a la señal de referencia E. De este modo, el gas se mantiene a volumen constante.

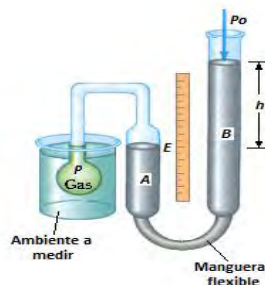


Figura 2-6. Diagrama de un termómetro de gas.

Los termómetros de gas se utilizan principalmente en las oficinas de normalización y en algunos laboratorios de investigación universitarios. Generalmente son grandes, voluminosos y lentos en alcanzar el equilibrio térmico.

Si se realizan medidas de diferentes temperaturas con termómetros que contienen gases distintos se llega a la conclusión de que la lectura de los termómetros es independiente del gas utilizado, siempre que la presión del gas sea pequeña y que la temperatura a medir se encuentre suficientemente lejos del punto de licuación el gas.

2.7 Termómetro de diodos

Se puede usar un diodo semiconductor ordinario como sensor de temperatura. Un diodo es el sensor de temperatura de menor costo que se puede hallar, y a pesar de ser tan barato es capaz de producir resultados más que satisfactorios. Sólo es necesario hacer una buena calibración y mantener una corriente de excitación bien estable. El voltaje sobre un diodo conduciendo corriente en directo tiene un coeficiente de temperatura de alrededor de $2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ y la variación, dentro de un intervalo, es razonablemente lineal. Se debe establecer una corriente básica de excitación, y lo mejor es utilizar una fuente de corriente constante, o si no un resistor conectado a una fuente estable de voltaje.



Figura 2-7. Diodo 1N4148 comúnmente utilizado como sensor de temperatura.

Además de los mencionados existen otras variedades de sensores:

- Termómetros de cuarzo
- Termómetros de fluorescencia
- Cristales termométricos y pinturas termosensibles
- Termómetros acústicos
- Termómetros infrarrojos (Pirómetros).
- Métodos ópticos: interferometría, ombroscopia, etc.

CAPÍTULO 3: DISPOSITIVOS DE ELECTRÓNICA ANALÓGICA EN EL CONTROL DE TEMPERATURA

3.1 Resistores

La resistencia es una propiedad de un objeto o sustancia que hace que se resista u oponga al paso de una corriente eléctrica en un circuito cerrado. La abreviatura habitual para la resistencia eléctrica es R, y el símbolo del ohm es la letra griega omega, Ω .

La resistencia de un circuito eléctrico está determinada según la llamada ley de Ohm, la cual establece que la tensión V a lo largo de un resistor es directamente proporcional a la corriente i que fluye por el mismo esto es:

$$R = V/i$$



Figura 3-1. Símbolos más comunes para representar a los resistores y a los potenciómetros.

La unidad de resistencia es el ohm, que es la resistencia de un conductor si es recorrido por una corriente de un ampere cuando se le aplica una tensión de 1 volt.

El elemento de circuito que se utiliza para hacer un modelo del comportamiento de resistencia a la corriente de un material es el resistor, los cuales se utilizan para limitar el valor de la corriente o para fijar el valor de la tensión. Los dos tipos de resistores fijos más comunes son de alambre enrollado y de película de carbón.

Para poder saber el valor de un resistor o resistencia sin tener que medirlas, existe un código de colores de las resistencias que nos ayuda a obtener con facilidad este valor con sólo verlas.

Para caracterizar un resistor hacen falta tres valores: resistencia eléctrica, disipación máxima y precisión o tolerancia. Estos valores se indican normalmente en el encapsulado dependiendo del tipo de éste.

Existen también resistores variables que tienen una resistencia ajustable, un resistor variable común son los potenciómetros que son elementos de tres terminales con un contacto deslizante, al deslizar dicho contacto varía la resistencia entre la terminal del mismo y las terminales fijas.



Figura 3-2. Resistores fijos y variables empleados comúnmente.

3.2 Capacitores

Se llama capacitor a un dispositivo que almacena carga eléctrica. Un capacitor está formado por dos placas metálicas o armaduras paralelas, de la misma superficie y encaradas, separadas por una lámina no conductora o dieléctrico. Al conectar una de las placas a un generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa. Por su parte, teniendo una de las placas cargada negativamente (Q-) y la otra positivamente (Q+) sus cargas son iguales y la carga neta del sistema es cero, sin embargo, se dice que el capacitor se encuentra cargado con una carga Q.

Se dice que el capacitor almacena la carga eléctrica, la cual está representada por Q, es directamente proporcional a la tensión aplicada, V, de modo que:

$$Q = CV$$

Donde C es la constante de proporcionalidad conocida como capacitancia.



Figura 3-3. Símbolos más comunes para representar a los capacitores fijos y variables.

Los dieléctricos utilizados comúnmente son el aire, la mica, la cerámica, el papel, el aceite y el vacío, y son aplicados según la utilidad que se pretenda dar al dispositivo.



Figura 3-4. Tipos de capacitores fijos y variables comúnmente utilizados.

3.3 Inductores

Un inductor o bobina es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

Un inductor consiste en un arrollamiento de hilo conductor. La inductancia resultante es directamente proporcional al número y diámetro de las espiras y a la permeabilidad del interior del arrollamiento, y es inversamente proporcional a la longitud de la bobina.

Los inductores ideales no disipan energía como lo hacen los resistores. Pero en la práctica, el inductor real presenta una resistencia de devanado que disipa energía. A continuación figura un modelo práctico (simplificado) de inductor.

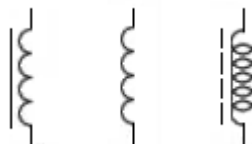


Figura 3-5. Símbolos más comunes para representar a los inductores.

La clasificación de los inductores se realiza por diversas características

El núcleo o soporte:

- Núcleo de aire
- Núcleo de hierro
- Núcleo de ferrita

Forma constructiva:

- Solenoides
- Toroides

Frecuencia de la corriente aplicada:

- Alta frecuencia
- Baja frecuencia

Característica de su valor:

- Fijos
- Ajustables.



Figura 3-6. Algunos tipos comunes de inductores.

Las características técnicas que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar los inductores para determinada aplicación son:

- Valor inductivo
- Tolerancia
- Tamaño y requisitos de montaje
- Margen de frecuencias o frecuencia central de trabajo
- Capacidad parásita entre bornes: tiene influencia al trabajar en alta frecuencia porque puede hacer que el inductor se comporte como un cortocircuito.
- Resistencia de aislamiento entre espiras: si se supera el voltaje máximo entre terminales, se perfora el aislante del hilo conductor.
- Corriente admisible por el hilo conductor
- Q (factor de calidad o de mérito): se define como la relación entre la reactancia inductiva y la resistencia óhmica del inductor ($Q=2\pi fL / R$). Es deseable que la resistencia sea baja y por ende que el Q sea alto. Según la fórmula, Q tendría que aumentar con la frecuencia, sin embargo no es así porque también aumenta la resistencia.

3.4 Reguladores de tensión

Para su funcionamiento, los circuitos electrónicos necesitan de una fuente de alimentación que será la encargada de suministrar la energía eléctrica, en la cantidad y calidad que los circuitos, equipos o sistemas necesiten.

La red de energía eléctrica suministra un voltaje generalmente de 127[V] ó 220[V] a una frecuencia de 60[Hz], la mayor parte de los circuitos electrónicos necesitan de un voltaje menor y continuo; se requiere por lo tanto de un circuito que realice esta operación, que es el regulador de tensión. La señal que proviene de la línea sufre variaciones, por lo que es rectificadas y filtrada para obtener un voltaje continuo que presenta ondulaciones, con esto la tensión obtenida a la salida no será ni estable ni pura, por lo que recibe el nombre de voltaje no regulado.

El objetivo fundamental del uso del regulador de voltaje es obtener un voltaje prácticamente constante e independiente de la corriente de carga, de las variaciones del voltaje de la línea y de la temperatura.

Existen varias maneras de lograr un voltaje estable, pero en general se tienen que utilizar varios componentes discretos, además de que se requiere un diseño más complicado y circuitos más grandes. La alternativa es utilizar algún regulador de tensión integrado, disponible para casi todos los voltajes y corrientes para los que se quiera utilizar.

3.4.1 Reguladores integrados lineales

Actualmente los reguladores de voltaje son utilizados por sus evidentes ventajas como son, buena estabilización, pequeño tamaño y peso, bajo costo y gran sencillez en el montaje práctico. En la práctica moderna es utilizado un simple chip regulador de voltaje para suministrar niveles estándar de voltajes (± 5 , ± 6 , ± 8 , ± 9 , ± 10 , ± 12 , ± 15 , ± 18 y ± 24 volts) con corrientes de salida del orden de los amperes, tales reguladores son circuitos integrados de tres terminales con voltajes de salida fijos, presentan circuitos de protección para limitar la corriente y circuitos de protección térmica; el costo de tales circuitos es comparable con el de un simple transistor de alta potencia.

3.4.1.1 Regulador de voltaje integrado 78XX

Dentro de los reguladores de voltaje con salida fija, se encuentran los pertenecientes a la familia LM78XX, donde las siglas XX, corresponden al valor del voltaje de salida, por ejemplo el LM7805 entrega a su salida una tensión de 5[Vdc].

Una conexión típica de este circuito se muestra en la siguiente figura, en donde el capacitor conectado a la entrada del integrado, suprime los efectos inductivos que pudieran presentarse en estas terminales debido a la relativa lejanía del estabilizador con respecto a la sección de rectificación y filtraje, mientras que el capacitor a la salida, garantiza la estabilidad del circuito en estado transitorio. Para su correcto funcionamiento requiere de una corriente máxima de (I_Q máx) de 8[mA] y de un voltaje a la entrada por lo menos 3[V] mayor que el que se espera a la salida.

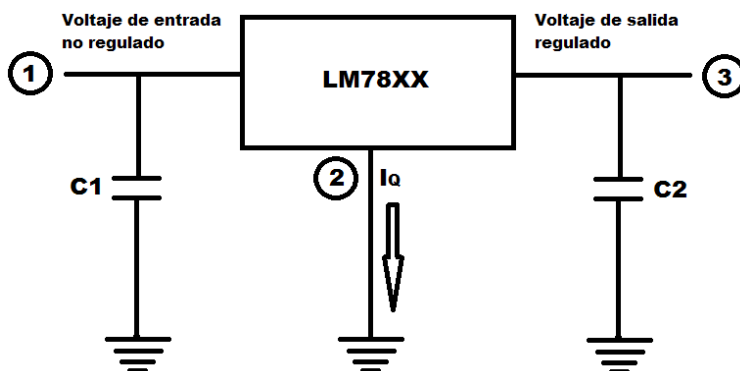


Figura 3-7. Esquema de conexión típica del circuito integrado 78XX.

Este circuito integrado puede ser utilizado directamente como recomienda el fabricante en el manual de datos o formando parte de un circuito con componentes externos para ampliar las capacidades de voltaje y corriente del mismo, en este caso son afectadas las características de estabilidad del circuito dadas por el fabricante.

3.5 Dispositivos de control de potencia

3.5.1 Relevadores

Un relevador, también llamado relé, es un dispositivo, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten cerrar o abrir otros circuitos independientes.

En general se pueden distinguir en el esquema general de un relevador, los siguientes bloques:



Figura 3-8. Diagrama de bloques que conforman a un relevador.

Es importante saber cuál es la resistencia del embobinado del electroimán que activa el relé y con cuanto voltaje éste se activa ya que estos parámetros nos informan que magnitud debe de tener la señal que activará el relé y cuanta corriente se debe suministrar a éste.

Existen relevadores con interruptores normalmente abiertos (sin flujo eléctrico) y normalmente cerrados (con flujo eléctrico). Además de esa característica también existen relevadores con múltiples entradas y múltiples interruptores, como lo son:

- **De polo sencillo interruptor sencillo SPST (Single Pole Single Throw).**- Consiste en una sola entrada de corriente y un solo interruptor. El interruptor queda cerrado o abierto, según sean las condiciones dadas.



Figura 3-9. Símbolo común para representar a un interruptor de polo sencillo, interruptor sencillo.

- **De polo sencillo interruptor doble SPDT (Single Pole Double Throw).**- Consiste en una sola entrada de corriente y en este caso el interruptor doble consiste un interruptor que se cierra

mientras que otro se abre, o como un cambio de trayectoria del circuito partiendo de una entrada común

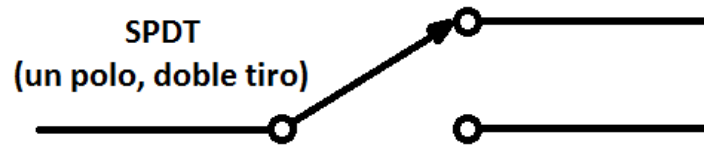


Figura 3-10. Símbolo común para representar a un interruptor de polo sencillo, interruptor doble.

- **De polo doble interruptor sencillo DPST (Double Pole Single Throw).**- En esta configuración se tienen dos entradas con una tierra común que pueden controlar de distintas maneras dos interruptores simples independientes.

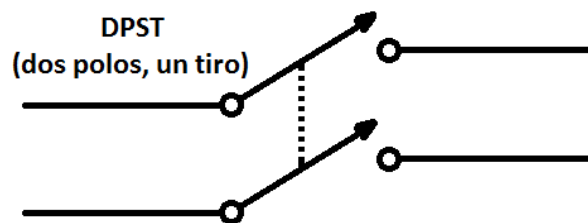


Figura 3-11. Símbolo común para representar a un interruptor de polo doble, interruptor sencillo.

- **De polo doble interruptor doble DPDT (Double Pole Double Throw).**- Se tienen dos entradas con una tierra común que pueden controlar de distintas maneras dos interruptores dobles independientes.

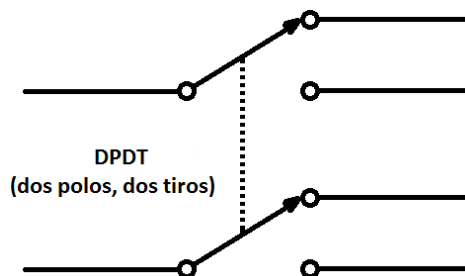


Figura 3-12. Símbolo común para representar a un interruptor de polo doble, interruptor doble.

Las características generales de los relés son:

- El aislamiento entre las terminales de entrada y de salida.
- Adaptación sencilla a la fuente de control.
- Posibilidad de soportar sobrecargas, tanto en el circuito de entrada como en el de salida.
- Las dos posiciones de trabajo en los bornes de salida de un relé se caracterizan por:
 - En estado abierto, alta impedancia.
 - En estado cerrado, baja impedancia.

Tipos de relevadores.

1. **Relevadores Electromecánicos.** Están formados por una bobina y unos contactos los cuales pueden conmutar corriente continua o bien corriente alterna.
 - a. *Relevadores Polarizados.* Llevan una pequeña armadura soldada a un imán permanente. El extremo inferior puede girar dentro de los polos de un electroimán y el otro lleva una cabeza de contacto. Si se excita al electroimán, se mueve la armadura y cierra los contactos. Si la polaridad es la opuesta girará en sentido contrario, abriendo los contactos o cerrando otro circuito.



Figura 3-13. Relevadores polarizados comunes.

- b. *Relevadores tipo Armadura.* Son los más antiguos y también los más utilizados. El electroimán hace bascular la armadura al ser excitada, cerrando los contactos dependiendo de si es N.O. o N.C. (normalmente abierto o normalmente cerrado).

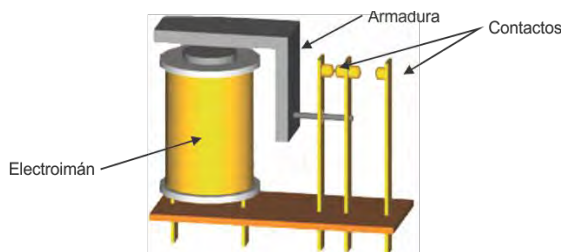


Figura 3-14. Partes de un relevador tipo armadura.

- c. *Relevadores de Núcleo Móvil.* Éstos tienen un émbolo en lugar de la armadura. Se utiliza un solenoide para cerrar sus contactos debido a su mayor fuerza atractiva (por ello es útil para manejar altas corrientes).

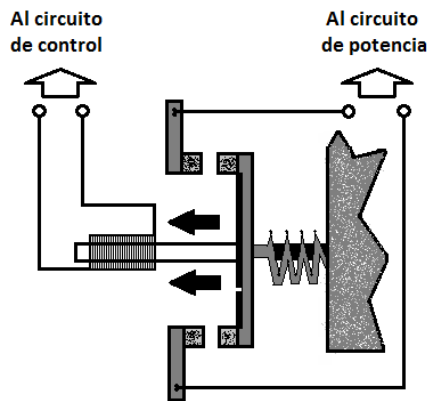


Figura 3-15. Diagrama de un relevador de núcleo móvil.

- d. *Relevadores tipo Reed o de Lengüeta.* Están formados por una ampolla de vidrio en cuyo interior están situados los contactos (pueden ser múltiples) montados sobre delgadas láminas metálicas. Dichos contactos se cierran por medio de la excitación de una bobina que está situada alrededor de dicha ampolla.

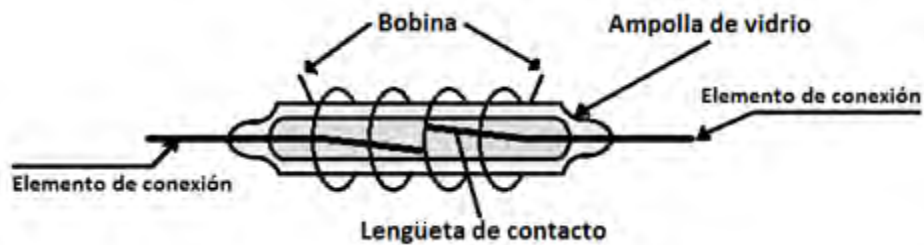


Figura 3-16. Partes de un relevador tipo reed.

2. **Relevadores de Estado Sólido.** Un relé de estado sólido SSR (Solid State Relay), es un dispositivo que utiliza un interruptor de estado sólido (por ejemplo un transistor o un tiristor), en lugar de contactos mecánicos (como los de los relés normales), para conmutar cargas de potencia a partir de señales de control de bajo nivel. Estas señales pueden provenir, por ejemplo, de circuitos digitales y estar dirigidas a motores, lámparas, solenoides, calefactores, etc.

Un relé de estado sólido ofrece varias ventajas notables respecto a los tradicionales relés y contactores electromecánicos: son más rápidos, tienen gran número de conmutaciones , larga vida útil ya que no se desgastan, ausencia de ruido mecánico de conmutación, escasa potencia de mando compatible con TTL y CMOS, livianos y confiables, son inmunes a los choques y a las vibraciones, pueden conmutar altas corrientes y altos voltajes sin producir arcos ni ionizar el aire circundante, aislado de influencias exteriores por un recubrimiento plástico, generan muy poca interferencia, además proporcionan varios kilovoltios de aislamiento entre la entrada y la salida .

Estructura del SSR

- Circuito de entrada o de control
 - Control por tensión continua en donde el circuito de entrada suele ser un led solo o con una resistencia en serie, también podemos encontrarlo con un diodo en antiparalelo para evitar la inversión de la polaridad por accidente. Los niveles de entrada son compatibles con TTL, CMOS y otros valores normalizados.
 - Control por tensión alterna en donde el circuito de entrada suele ser como el anterior incorporando un puente rectificador integrado y una fuente de corriente continua para polarizar el diodo.

- Acoplamiento

El acoplamiento con el circuito se realiza por medio de un optoacoplador o por medio de un transformador que se encuentra acoplado de forma magnética con el circuito de disparo del triac.

- Circuito de conmutación o de salida

El circuito de salida contiene los dispositivos semiconductores de potencia con su correspondiente circuito excitador. Este circuito será diferente según se quiera conmutar CC o CA.



Figura 3-17. Algunos tipos de relevadores de estado sólido.

3. **Relevadores de Láminas.** Este tipo de relé se utilizaba para discriminar distintas frecuencias. Consiste en un electroimán excitado con la corriente alterna de entrada que atrae varias varillas sintonizadas para resonar a sendas frecuencias de interés. La varilla que resuena acciona su contacto; las demás, no. El desarrollo de la microelectrónica y los PLL integrados ha relegado estos componentes al olvido.



Figura 3-18. Vista frontal de un relevador de láminas.

4. **Relevadores de Corriente Alterna.** Cuando se excita la bobina de un relé con corriente alterna, el flujo magnético en el circuito magnético, también es alterno, produciendo una fuerza pulsante, con frecuencia doble, sobre los contactos.



Figura 3-19. Típico relevador de corriente alterna.

3.5.2 Dispositivos de estado sólido

Los dispositivos de estado sólido son pequeños componentes electrónicos activos que están contruidos por materiales semiconductores, por los cuales se conduce corriente eléctrica y son utilizados en la fabricación de circuitos integrados y aparatos electrónicos.

Existen muchos materiales semiconductores distintos, pero el silicio, ingrediente principal de la arena, es el más popular. Para convertir el silicio puro en un semiconductor, se deben agregar átomos de impureza a cuyo proceso se le llama dopado.

Hay dos tipos de impurezas, una que produce un exceso de portadores de cargas negativas, y la otra un exceso de huecos o portadores de cargas positivas.

Si se agrega una pequeña cantidad de arsénico o fósforo al silicio, existirá en el material un ligero exceso de cargas negativas. Esto se debe a que estas sustancias tienen cinco electrones en su órbita externa. El quinto electrón (carga negativa), no puede unirse con ningún átomo y queda flotando como un electrón libre o portador potencial de la corriente. Este nuevo tipo de material obtenido es conocido como un semiconductor tipo N, porque tiene un exceso de cargas negativa.

Cuando se le agrega al silicio, boro o galio, habrá una pequeña deficiencia de cargas negativas. Como resultado habrá huecos en el semiconductor. El hueco puede ser tomado como un lugar cargado positivamente o portador de carga positiva. El material resultante es conocido como un semiconductor tipo P.

Un grupo de átomos de silicio que comparte sus electrones externos forman un arreglo regular llamado cristal.

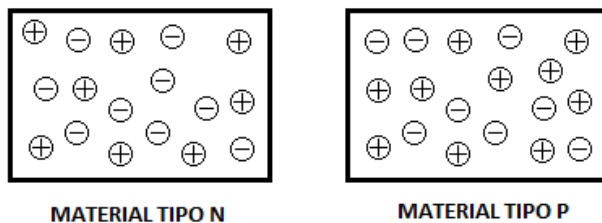


Figura 3-20. Cristales de material tipo N y de tipo P.

Si se conecta un voltaje a través de un cristal de tipo N, el resultado es el flujo de corriente de las cargas negativas libres.

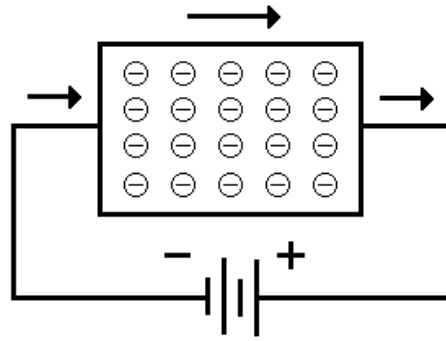


Figura 3-21. Flujo de corriente de las cargas negativas libres de un cristal de silicio tipo N.

Si se conecta un voltaje a través de un cristal de silicio tipo P, los portadores de corriente son los huecos. Dentro del cristal tipo P, los huecos se mueven en la dirección opuesta al movimiento de las cargas negativas.

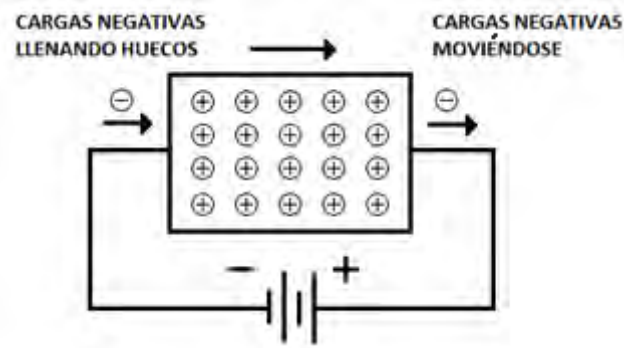


Figura 3-22. Flujo de corriente en un cristal de material tipo P.

Unión PN

Cuando a un bloque de un semiconductor tipo N se une a un bloque de un semiconductor de tipo P, se forma una unión o juntura llamada diodo de unión PN o juntura PN. En este proceso se forma una barrera eléctrica en la unión de los materiales, que evita que los electrones de la zona N se pasen a la zona P. El potencial establecido en la barrera depende de la cantidad de impurezas del cristal y es del orden de 0.1 a 0.3 [V]. Este voltaje se llama barrera de potencial y su efecto es el mismo que si hubiera una batería conectada a la unión PN.

3.5.2.1 Diodos semiconductores

Son fabricados con material semiconductor. Son componentes electrónicos que sólo permiten el paso de corriente eléctrica en un sentido. Está formado por dos cristales semiconductores de Silicio y Germanio unidos entre sí.

El diodo semiconductor está constituido fundamentalmente por una unión PN añadiéndole una terminal de conexión a cada uno de sus extremos y una cápsula que aloja todo el conjunto, dejando al exterior las terminales que corresponden al ánodo (zona P) y al cátodo (zona N).

Si se le aplica un voltaje a la unión, la barrera desaparece y el diodo conduce el flujo de corriente.

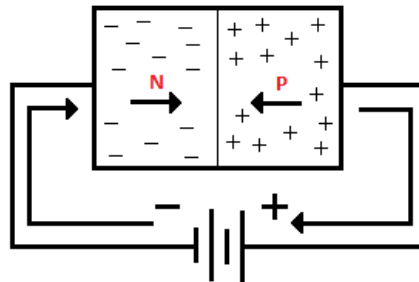


Figura 3-23. Conducción de corriente en un diodo semiconductor.

Los electrones son rechazados por el polo negativo de la batería hacia la unión, y al mismo tiempo los huecos son rechazados por el polo positivo de la batería hacia la unión, donde estos huecos atraen a los electrones, creándose un camino para completar el circuito, permitiendo que la corriente circule.

Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización directa o inversa.

Polarización directa

Si se le aplica a la unión una tensión exterior de signo contrario a la barrera de potencial, ésta irá disminuyendo en anchura. A mayor tensión aplicada externamente corresponderá una barrera interna menor y se podrá llegar a conseguir que dicha barrera desaparezca totalmente.

A la tensión externa que anula la barrera de potencial de la unión y la deja preparada para el paso de los respectivos portadores mayoritarios, se le denomina tensión umbral. Se le representa como V_u y sus valores prácticos son:

Para el silicio V_u : 0.4 – 0.5 [V]

Para el germanio V_u : 0.05 – 0.06 [V]

En esta situación, al aplicar un aumento en la tensión exterior, los electrones se sentirán atraídos por el polo positivo de la pila y los huecos por el negativo de la misma. No hay dificultad para atravesar la unión y por tanto aparecerá una corriente de mayoritarios a través del circuito. A partir de aquí, cualquier aumento de tensión provoca un aumento de la corriente.

Al conjunto de tensiones que crean corriente proporcional en el diodo se les llama tensiones de polarización directa o de funcionamiento. Sus valores típicos son:

Para el silicio: 0.5 – 0.8 [V]

Para el germanio: 0.06 – 0.15 [V]

Existe un momento en el proceso en el cual el aumento de corriente en la unión, tendrá que parar. Y esto es así, porque a partir de un determinado valor de la tensión exterior aplicada, los electrones se neutralizan en mayor número con los huecos en el interior del diodo y son pocos los que pueden salir al circuito exterior. Es decir que el aumento es absorbido por el mismo diodo. A esta tensión a partir de la cual la corriente a través del diodo se mantiene constante, (en la práctica aumenta ligeramente) se le denomina tensión de saturación. Sus valores típicos son:

Para el silicio V_{sat} : 0.8 – 0.9 [V]

Para el germanio V_{sat} : 0.15 – 0.2 [V]

Cualquier aumento de corriente posterior a obtener el voltaje de saturación puede originar la destrucción del diodo.

Polarización inversa

Si la tensión aplicada externamente al diodo es del mismo signo que la barrera de potencial interna se dice que el diodo está polarizado inversamente. El terminal positivo de la pila atrae a los electrones del material N apartándolos de la unión, mientras que el negativo atrae a las cargas positivas del material P, apartándolos también de la unión. Se crea, por tanto, en la unión, una ausencia de carga, formándose una corriente que recibe el nombre de "corriente inversa de saturación" o "corriente de fuga". Su valor es prácticamente despreciable, pues es del orden de los nano amperes [nA].

Al ir aumentando esta tensión inversa llega un momento en que el diodo pierde su capacidad de bloqueo y fluye entonces una gran corriente inversa. Esta tensión recibe el nombre de "tensión de ruptura". Normalmente en esta situación el diodo se destruye.

Tipos de Diodos

➤ *Diodo rectificador*

Permite la separación de ciclos positivos de una señal de corriente alterna, si se aplica al diodo una tensión de corriente alterna durante los medios ciclos positivos, se polariza en forma directa, permitiendo el paso de la corriente eléctrica, pero durante los medios ciclos negativos, el diodo se polariza de manera inversa, evitando el paso de la corriente en tal sentido.

Durante la fabricación de los diodos rectificadores, se consideran tres factores: la frecuencia máxima en que realizan correctamente su función, la corriente máxima en que pueden conducir en sentido directo y las tensiones directa e inversa máximas que soportarán.



Figura 3-24. Símbolo (a) y algunos tipos de diodos rectificadores (b).

➤ *Diodo Zener (Avalancha o de ruptura)*

Es un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en las zonas de rupturas, el diodo Zener es la parte esencial de los reguladores de tensión casi constantes con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red, de la resistencia de carga y temperatura de la resistencia Zener. Un diodo Zener, como cualquier diodo, tiene cierta resistencia interna en sus zonas P y N; al circular una corriente a través de éste se produce una pequeña caída de tensión de ruptura.

Los diodos Zener mantienen la tensión entre sus terminales prácticamente constante en un amplio rango de intensidad de corriente y temperatura, cuando están polarizados inversamente, por ello, este tipo de diodos se emplean en circuitos estabilizadores o reguladores de la tensión.



Figura 3-25. Símbolo del diodo Zener (a) y su imagen real (b).

➤ **Fotodiodo**

Es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, en ausencia de luz exterior generan una tensión muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. Esta corriente presente en ausencia de luz recibe el nombre de corriente de oscuridad.

En el fotodiodo la corriente (que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa. Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

El material empleado en la composición de un fotodiodo es un factor crítico para definir sus propiedades. Suelen estar compuestos de silicio sensible a la luz visible (con una longitud de onda de hasta 1 [μm]); germanio para luz infrarroja (con una longitud de onda hasta aproximadamente de 1.8 [μm]); o de cualquier otro material semiconductor.

Aplicación: debido a que el fotodiodo responde a los cambios de oscuridad a iluminación y viceversa con velocidad, puede utilizarse en circuitos con tiempo de respuesta pequeño. Se usa en los lectores de CD, recuperando la información grabada en el surco del CD transformando la luz del haz de láser reflejada en el mismo en impulsos eléctricos para ser procesados por el sistema y obtener como resultado los datos grabados. Así también son utilizados en fibra óptica.



Figura 3-26. Símbolo (a) y algunos tipos de fotodiodos (b).

➤ *LED (Light Emitting Diode)*

El diodo emisor de luz o también conocido como led, es un dispositivo semiconductor que emite luz incoherente de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica. Este fenómeno es una forma de electroluminiscencia. El color, depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo. Los diodos emisores de luz que emiten luz ultravioleta también reciben el nombre de UV LED (Ultraviolet Light-Emitting Diode) y los que emiten luz infrarroja se llaman IRED (Infrared Emitting Diode).

Los diodos infrarrojos (IRED) se emplean desde mediados del siglo XX en mandos a distancia de televisores, habiéndose generalizado su uso en otros electrodomésticos como equipos de aire acondicionado, equipos de música, etc. y en general para aplicaciones de control remoto, así como en dispositivos detectores, además de ser utilizados para transmitir datos entre dispositivos electrónicos como en redes de computadoras y dispositivos como teléfonos móviles, computadoras de mano, aunque esta tecnología de transmisión de datos ha dado paso al bluetooth en los últimos años, quedando casi obsoleta.



Figura 3-27. Símbolo (a) y algunos tipos de diodos emisores de luz (b).

➤ *Diodo láser*

El diodo láser es un dispositivo semiconductor similar a los diodos LED pero que bajo las condiciones adecuadas emite luz láser. A veces se los denomina diodos láser de inyección, o por sus siglas inglesas LD o ILD.

En los diodos láser, para favorecer la emisión estimulada y generación de luz láser, el cristal semiconductor del diodo puede tener la forma de una lámina delgada con un lado totalmente reflectante y otro sólo reflectante de forma parcial (aunque muy reflectante también), lográndose así una unión PN de grandes dimensiones con las caras exteriores perfectamente paralelas y reflectantes. Este conjunto forma una guía de onda similar a un resonador de tipo Fabry-Perot. En ella, los fotones emitidos en la dirección adecuada se reflejarán repetidamente en dichas caras reflectantes (en una

totalmente y en la otra sólo parcialmente), lo que ayuda a su vez a la emisión de más fotones estimulados dentro del material semiconductor y consiguientemente a que se amplifique la luz (mientras dure el bombeo derivado de la circulación de corriente por el diodo). Parte de estos fotones saldrá del diodo láser a través de la cara parcialmente transparente (la que es sólo reflectante de forma parcial). Este proceso da lugar a que el diodo emita luz, que al ser coherente en su mayor parte (debido a la emisión estimulada), posee una gran pureza espectral. Por tanto, como la luz emitida por este tipo de diodos es de tipo láser, a estos diodos se los conoce por el mismo nombre.

Ventajas:

- Son muy eficientes.
- Son muy fiables.
- Tienen tiempos medios de vida muy largos.
- Son económicos.
- Permiten la modulación directa de la radiación emitida, pudiéndose modular a décimas de [GHz]
- Su volumen y peso es pequeño.
- El umbral de corriente que necesitan para funcionar es relativamente bajo.
- Su consumo de energía es reducido (comparado con otras fuentes de luz).
- El ancho de banda de su espectro de emisión es angosto (puede llegar a ser de sólo algunos [kHz]).

Aplicaciones:

- Comunicaciones de datos por fibra óptica.
- Lectores de CD's, DVD's y formatos derivados.
- Interconexiones ópticas entre circuitos integrados.
- Impresoras láser.
- Escáneres o digitalizadores.
- Sensores.

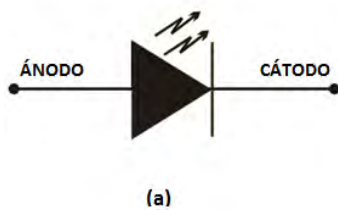


Figura 3-28. Símbolo del diodo láser (a) y su imagen real (b).

➤ *Diodo Schottky*

El diodo Schottky o diodo de barrera Schottky, llamado así en honor al físico alemán Walter H. Schottky, es un dispositivo semiconductor que proporciona conmutaciones muy rápidas entre los estados de conducción directa e inversa (menos de 1 [ns] en dispositivos pequeños de 5 [mm] de diámetro) y muy bajas tensiones umbral (también conocidas como tensiones de codo). La tensión de codo es la diferencia de potencial mínima necesaria para que el diodo actúe como conductor en lugar de circuito abierto; esto claro, dejando de lado la región Zener, que es cuando más bien existe una diferencia de potencial lo suficientemente negativa para que, a pesar de estar polarizado en contra del flujo de corriente, éste opere de igual forma como lo haría regularmente.

La alta velocidad de conmutación permite rectificar señales de muy altas frecuencias y eliminar excesos de corriente en circuitos de alta intensidad.

A diferencia de los diodos convencionales de silicio, que tienen una tensión umbral (valor de la tensión en directa a partir de la cual el diodo conduce) de 0.7 [V], los diodos Schottky tienen una tensión umbral de aproximadamente 0.2 V a 0.4 [V] empleándose, por ejemplo, como protección de descarga de células solares con baterías de plomo ácido.

La limitación más evidente del diodo de Schottky es la dificultad de conseguir resistencias inversas relativamente elevadas cuando se trabaja con altos voltajes inversos pero el diodo Schottky encuentra una gran variedad de aplicaciones en circuitos de alta velocidad para computadoras donde se necesiten grandes velocidades de conmutación y mediante su poca caída de voltaje en directo permite poco gasto de energía.



Figura 3-29. Símbolo del diodo Schottky (a) y su imagen real (b).

Existen otros tipos de diodos que se utilizan de acuerdo con las aplicaciones específicas, algunos ejemplos son los siguientes:

- *Diodo Schockley.* Se emplean en fuentes de potencia, sistemas digitales y en equipos de alta frecuencia.
- *Diodo Túnel.* Se utilizan como detectores, amplificadores, osciladores multiplicadores interruptores, etc., en aplicaciones de alta frecuencia.
- *Diodo Varactor.* Son empleados en osciladores, multiplicadores, amplificadores, generadores de FM y otros circuitos de alta frecuencia.
- *Diodo de Microondas.* Son dispositivos desarrollados para trabajar en frecuencias muy elevadas. Los más conocidos son los diodos Gunn, PIN, e IMPATT, los primeros se emplean principalmente como resistencias variables por voltaje y los diodos Gunn e IMPATT como osciladores.
- *Diodo Detector.* Se emplea por ejemplo, en receptores de radio para separar la componente de alta frecuencia (portadora) de la componente de baja frecuencia (información audible).

3.5.2.2 Transistores

El transistor es un dispositivo de estado sólido que tiene tres terminales o conexiones. Su descubrimiento e industrialización, marcaron el inicio de una verdadera revolución en la electrónica.

La palabra transistor se deriva del término transfer resistor (resistencia de transferencia) y designa, en forma genérica, a un componente electrónico de tres terminales cuya resistencia es una función del nivel de corriente o voltaje aplicado a uno de sus terminales. Aprovechando esta propiedad, los transistores se utilizan como fuentes de corriente controladas en amplificadores, osciladores, mezcladores, interruptores y muchas otras aplicaciones.

Existen diferentes tipos de transistores, de los cuales la clasificación más aceptada consiste en dividirlos en transistores bipolares o BJT (Bipolar Junction Transistor) y transistores de efecto de campo o FET (Field Effect Transistor).

Transistores bipolares

Los Transistores Bipolares o TBJ's se clasifican en transistores NPN y transistores PNP, según el tipo de material empleado para su fabricación. De esta manera pueden ser construidos ya sea de dos capas de material tipo N y una capa tipo P, o bien dos capas de material tipo P y una tipo N.

Cada sección o capa del transistor tiene una terminal conectado a ella. Estas secciones se conocen como: emisor, base y colector y se etiquetan con las literales E, B y C respectivamente. En los símbolos que se usan para representar a los transistores, la dirección de la flecha indica si el transistor es NPN o PNP.

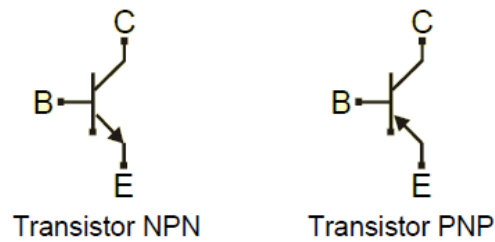


Figura 3-30. Símbolos de los transistores.

Además de su clasificación en transistores NPN y PNP los transistores bipolares también se clasifican de la siguiente manera:

Por el material semiconductor empleado

- Transistores de silicio
- Transistores de germanio

Por la disipación de potencia

- Transistores de baja potencia
- Transistores de mediana potencia
- Transistores de alta potencia

Por la frecuencia de trabajo

- Transistores de baja frecuencia
- Transistores de alta frecuencia

Los transistores de unión bipolar tienen diferentes regiones operativas, definidas principalmente por la forma en que son polarizados.

➤ **Región activa**

Cuando un transistor no está ni en su región de saturación ni en la región de corte entonces está en una región intermedia, la región activa. En esta región la corriente de colector (I_c) depende principalmente de la corriente de base (I_b), β (ganancia de corriente, es un dato del fabricante) y de las resistencias que se encuentren conectadas en el colector y emisor. Esta región es la más importante si lo que se desea es utilizar el transistor como un amplificador de señal.

➤ **Región inversa**

Al invertir las condiciones de polaridad del funcionamiento en modo activo, el transistor bipolar entra en funcionamiento en modo inverso. En este modo, las regiones del colector y emisor intercambian roles. Debido a que la mayoría de los TBJ son diseñados para maximizar

la ganancia de corriente en modo activo, el parámetro beta en modo inverso es drásticamente menor al presente en modo activo.

➤ **Región de corte**

Un transistor está en corte cuando:

$$I_c = I_e = 0$$

En este caso el voltaje entre el colector y el emisor del transistor es el voltaje de alimentación del circuito (como no hay corriente circulando, no hay caída de voltaje). Este caso normalmente se presenta cuando la corriente de base es igual a cero.

➤ **Región de saturación**

En este caso la magnitud de la corriente depende del voltaje de alimentación del circuito y de las resistencias conectadas en el colector o el emisor o en ambos. Este caso normalmente se presenta cuando la corriente de base es lo suficientemente grande como para inducir una corriente de colector β veces más grande (recordar que $I_c = \beta * I_b$). En este caso el transistor conduce totalmente y se comporta como un circuito cerrado.

Los transistores se pueden conectar en tres configuraciones diferentes: configuración de emisor común, configuración de base común y configuración de colector común.

- **Emisor común.** La señal se aplica a la base del transistor y se extrae por el colector. El emisor se conecta al neutro tanto de la señal de entrada como al de la salida. En esta configuración se tiene ganancia tanto de tensión como de corriente y alta impedancia de entrada.
- **Base común.** La señal se aplica al emisor del transistor y se extrae por el colector. La base se conecta al neutro común tanto de la señal de entrada como al de la salida. En esta configuración se tiene ganancia sólo de tensión. La impedancia de entrada es baja y la ganancia de corriente está un poco por debajo de uno, debido a que parte de la corriente del emisor sale por la base.
- **Colector común.** La señal se aplica a la base del transistor y se extrae por el emisor. El colector se conecta al neutro tanto de la señal de entrada como el de la salida. En esta configuración se tiene ganancia de corriente, pero no de tensión que es ligeramente menor que la unidad.

Los transistores se fabrican en serie, formando simultáneamente varios cientos o millares de unidades sobre una oblea semiconductor de 38 a 50 mm de diámetro y luego cortándolos uno por uno. Una vez contruidos, los transistores se hospedan en cápsulas plásticas o metálicas. La cápsula

protege el transistor de la humedad y los contaminantes, sirve como disipador de calor, proporciona los pines de acceso, facilita su manipulación e identificación, etc.

Los tamaños de los transistores se han establecido como tipos de empaque a los cuales se les ha asignado una nomenclatura especial con letra y números. Los tipos de empaque más comunes se han designado como TO-92, TO-18, TO-220, TO-3.



Figura 3-31. Encapsulados más comunes de los transistores.

Los transistores, como todos los semiconductores, se identifican por un código o referencia que representa sus características exactas. Existen básicamente tres sistemas de identificación: el americano, el europeo y el japonés. En el sistema americano, la referencia empieza por 2N (2N2222), en el europeo por BC, BS o BF (BC109) y en el sistema japonés por 2SA, 2SB, 2SC o 2SD (2SC458, 2SA65, 2SD926). A pesar de esta normalización, muchos fabricantes emplean sus propias referencias.

Los transistores bipolares se especifican principalmente por la máxima corriente de colector (I_C) que puede manejar en forma segura, el máximo voltaje de polarización inversa que puede ser aplicado entre colector y emisor sin entrar en avalancha (V_{CE0}) y la ganancia de corriente beta (h_{FE}).

Otros parámetros que especifican los fabricantes en las hojas de datos son el máximo voltaje entre emisor y base (V_{BE0}), la potencia máxima total (P_{TOT}), la frecuencia de transición (f_T), la figura de ruido (NF), entre otras.

Transistores de efecto de campo

El transistor de efecto de campo o FET, es en realidad una familia de transistores que se basan en el campo eléctrico para controlar la conductividad de un canal en un material semiconductor. Los FET pueden plantearse como resistencias controladas por una diferencia de potencial.

Los transistores de efecto de campo más conocidos son los JFET (Junction Field Effect Transistor), MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET).

Tienen tres terminales, denominadas compuerta (Gate), drenador (Drain) y fuente (Source) que corresponden a las terminales emisor, base y colector respectivamente de cualquier transistor bipolar. Estas terminales se indican en los diagramas con las literales S, G y D respectivamente.

Así como los transistores bipolares se dividen en NPN y PNP, los de efecto de campo son también de dos tipos: canal N o canal P, dependiendo de si la aplicación de una tensión positiva en la compuerta pone al transistor en estado de conducción o de no conducción respectivamente.

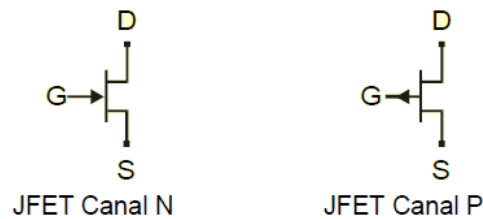


Figura 3-32. Símbolos esquemáticos para los JFETs de canal N y de canal P.

Las formas de polarizar a un FET son las siguientes:

- Polarización Fija
- Autopolarización
- Polarización por división de tensión
- Polarización por fuente de corriente

Los JFET's tienen tres configuraciones básicas que son: source común, gate común y drain común estas configuraciones también son válidas para los MOSFET.

Mosfet

En los transistores FET tipo MOSFET, la compuerta o gate está aislada eléctricamente de las otras partes del componente. El nombre de MOSFET viene de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, que significa: transistor de efecto de campo con semiconductores de óxido metálico.

Un transistor MOSFET consiste en un sustrato de material semiconductor dopado en el que, mediante técnicas de difusión de dopantes, se crean dos islas de tipo opuesto separadas por un área sobre la cual se hace crecer una capa de dieléctrico culminada por una capa de conductor. Los transistores MOSFET se dividen en dos tipos fundamentales dependiendo de cómo se haya realizado el dopaje:

- Tipo nMOS: Sustrato de tipo p y difusiones de tipo n.
- Tipo pMOS: Sustrato de tipo n y difusiones de tipo p.

Las áreas de difusión se denominan fuente (source) y drenador (drain), y el conductor entre ellos es la puerta (gate).

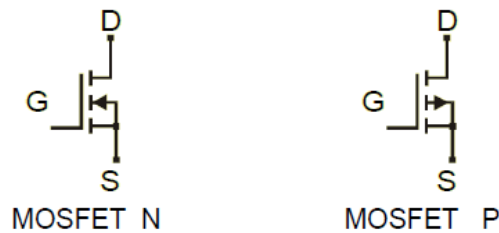


Figura 3-33. Símbolos del Mosfet.

El transistor MOSFET tiene los siguientes estados de funcionamiento:

- *Estado de corte*

Cuando la tensión de la puerta es idéntica a la del sustrato, el MOSFET está en estado de no conducción: ninguna corriente fluye entre fuente y drenador aunque se aplique una diferencia de potencial entre ambos. También se llama mosfet a los aislados por juntura de dos componentes.

- *Saturación*

Un MOSFET de enriquecimiento está polarizado en la zona de saturación cuando se cumple la siguiente condición:

$$I_{D(SAT)} < I_{D(ON)} \text{ cuando } V_{GS} = V_{GS(ON)}$$

La ecuación anterior nos indica la zona en que está funcionando el MOSFET. Dado un circuito con un MOSFET, podemos calcular $I_{D(SAT)}$. Si $I_{D(SAT)}$ es menor que $I_{D(ON)}$ cuando $V_{GS} = V_{GS(ON)}$, sabremos que el dispositivo está polarizado en la zona de saturación y es equivalente a una pequeña resistencia.

Los MOSFET's se identifican de la misma forma que los transistores bipolares por una referencia y se especifican principalmente por su transconductancia (g_m o g_{fs}), el voltaje máximo entre compuerta y fuente (V_{GS}), la corriente de drenaje con $V_{GS} = 0 \text{ V}$ (I_{DSS}), el voltaje de ruptura entre compuerta y fuente (BV_{GSS}) y la máxima corriente de drenaje (I_D). Otros parámetros que se especifican los fabricantes de MOSFET's en las hojas de datos de sus productos son la capacitancia de entrada (C_{iss}), la capacitancia de transferencia (C_{rss}), la potencia máxima (P_D) y la resistencia máxima entre drenador y fuente (r_{DSS}).

Fototransistor

Se llama fototransistor a un transistor sensible a la luz, normalmente a los infrarrojos. La luz incide sobre la región de base, generando portadores en ella. Esta carga de base lleva el transistor al estado de conducción. El fototransistor es más sensible que el fotodiodo por el efecto de ganancia propio del transistor.

Un fototransistor es igual a un transistor común, con la diferencia que el primero puede trabajar de las siguientes formas:

- Como transistor normal con la corriente de base I_b (modo común).
- Como fototransistor, cuando la luz que incide en este elemento hace las veces de corriente de base. I_p (modo de iluminación).
- Puede utilizarse de las dos en formas simultáneamente, aunque el fototransistor se utiliza principalmente con el pin de la base sin conectar.

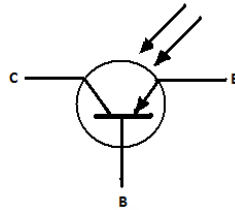


Figura 3-34. Símbolo común para representar al fototransistor.

En el mercado se encuentran fototransistores tanto con conexión de base como sin ella y tanto en cápsulas plásticas como metálicas (TO-72, TO-5) provistas de una lente.



Figura 3-35. Imagen real de un fototransistor.

Se han utilizado en lectores de cinta y tarjetas perforadas, lápices ópticos, etc. Para comunicaciones con fibra óptica se prefiere usar detectores con fotodiodos p-i-n. También se pueden utilizar en la detección de objetos cercanos cuando forman parte de un sensor de proximidad.

Se utilizan ampliamente encapsulados conjuntamente con un LED, formando interruptores ópticos (opto-switch), que detectan la interrupción del haz de luz por un objeto.

Para obtener un circuito equivalente de un fototransistor, basta agregar a un transistor común un fotodiodo.

3.5.2.3 Tiristores

Los tiristores son dispositivos semiconductores que tienen tres terminales. Una corriente pequeña en una de las terminales permite que una corriente mucho mayor fluya a través de las otras terminales. La corriente controlada está en encendido o en apagado; por lo que los tiristores no amplifican las señales fluctuantes como lo hacen los transistores. Por el contrario, son interruptores de estado sólido. Son dispositivos unidireccionales porque solamente transmiten la corriente en una única dirección. Se emplea generalmente para el control de potencia eléctrica.

El dispositivo consta de un ánodo y un cátodo, donde las uniones son de tipo PNPN entre los mismos. Por tanto se puede modelar como 2 transistores típicos PNP y NPN, por eso se dice también que el tiristor funciona con tensión realimentada.

Existen dos familias de tiristores: los rectificadores controlados de Silicio (SCR por sus siglas en inglés), y los tríodos de corriente alterna (TRIAC).

Rectificador controlado de silicio (SCR)

El SCR es como un diodo. Al igual que un diodo tiene un cátodo y ánodo, y deja pasar la corriente en un solo sentido, pero además tiene una terminal adicional llamada compuerta o "gate".

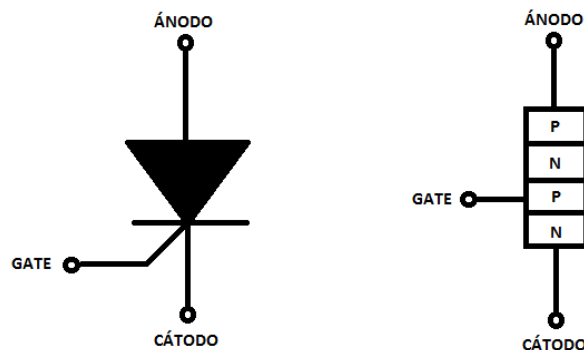


Figura 3-36. Símbolo y estructura del SCR.

La compuerta se utiliza para disparar el SCR al estado de conducción. Solamente cuando la compuerta recibe un voltaje positivo, conduce el SCR. Después, aunque no se le aplique ningún pulso a la compuerta, el SCR continua en conducción y la única manera de suspender la conducción es retirar o cambiar la polaridad del voltaje positivo que hay en el ánodo.

Los SCR se clasifican de acuerdo con la corriente que pueden interrumpir. Estas son las tres categorías generales, aunque se pueden obtener muchas otras presentaciones.

- *Baja corriente.* Los SCR de baja corriente incluyen aquellos que interrumpen desde un ampere a un nivel de hasta 100 volts.



Figura 3-37. Imagen real de un SCR de baja corriente.

- *Media corriente.* Estos son los SCR que interrumpen desde 10 amperes hasta un nivel de varios cientos de volts. Un uso bastante común es la interrupción de estado sólido para el encendido de los motores automotrices.



Figura 3-38. SCR de media corriente.

- *Alta corriente.* Estos SCR pueden interrumpir desde 2500 amperes hasta un nivel de varios miles de volts.



Figura 3-39. SCR común de alta corriente.

Triac

El TRIAC es un tiristor PNP de cuatro capas que puede conmutar corrientes de carga en ambas direcciones y ser disparado por señales de compuerta tanto positivas como negativas. Se utiliza principalmente para la conmutación de corriente alterna, aunque también puede emplearse para conmutar corriente directa. Sus campos de aplicación incluyen interruptores de potencia, desvanecedores de luces (dimers), controles de velocidad de motores, controles de temperatura, etc.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, un TRIAC es equivalente a la asociación de dos SCR's conectados en antiparalelo. Cuando se usan para interrumpir corriente alterna, los TRIAC permanecen en encendido sólo cuando la compuerta recibe la corriente. Si se interrumpe la corriente en la compuerta, el dispositivo cambia su estado a apagado y la corriente alterna pasa a través de cero volts.

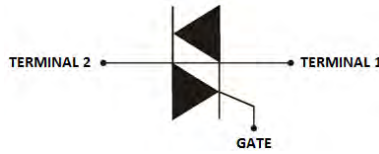


Figura 3-40. Símbolo del TRIAC.

Los TRIAC, al igual que los SCR se clasifican de acuerdo con la corriente que pueden interrumpir. Los TRIAC no poseen las altas capacidades de potencia que tienen los SCR. Éstas son las dos categorías principales.

- *Baja corriente.* Los TRIAC de baja corriente pueden interrumpir desde un amperio hasta un nivel de varios cientos de volts. También se utilizan en otros tipos de presentaciones externas.



Figura 3-41. Imagen real de un TRIAC de baja corriente.

- *Media corriente.* Estos TRIAC pueden conmutar hasta 40 amperes y tensiones de hasta 1000[V]. Se pueden adquirir en presentaciones muy diversas.



Figura 3-42. TRIAC común de media corriente.

El TRIAC se emplea como un interruptor electrónico, reemplazando con muchas ventajas a los relés y otro tipo de interruptores mecánicos, ya que por no tener partes móviles como los contactos metálicos, no sufre desgaste durante su operación y su operación es muy rápida.

3.5.2.4 Celda Peltier

El descubrimiento de los fenómenos termoeléctricos y la búsqueda de nuevas alternativas de generación de energía, han permitido un avance continuo en la tecnología termoeléctrica en los últimos años. Desde 1834 es conocido el efecto Peltier; no obstante, su aplicación práctica necesitó del desarrollo de los materiales semiconductores. Este efecto se caracteriza por aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente eléctrica. Una celda Peltier está conformada por dos materiales semiconductores, uno tipo P y otro tipo N que por lo general está fabricada con bismuto para la cara del semiconductor tipo P y con telurio para la cara tipo N, produciéndose así el efecto termoeléctrico Peltier.



Figura 3-43. Diagrama en donde se muestra la estructura interna de una Celda Peltier.

Internamente la celda Peltier posee elementos semiconductores altamente impurificados y dispuestos eléctricamente en serie mediante conductores de cobre. Para aislar los conductores de cobre del disipador, se agrega entre ellos una placa de cerámica que funciona como aislante.

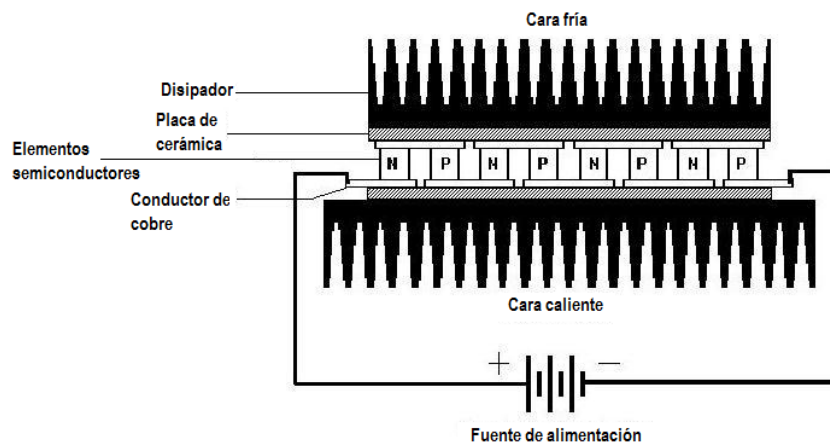


Figura 3-44. Corte transversal de la celda Peltier en donde se muestran los elementos semiconductores y las aletas disipadoras.

Una polarización como la mostrada en la figura anterior, se distribuye a lo largo de cada elemento semiconductor de la celda, es decir cada elemento semiconductor posee una diferencia de potencial proporcional a la polarización de entrada. Por esta razón, los portadores mayoritarios, electrones débilmente ligados, emigran hacia el lado positivo de cada uno de sus extremos en los elementos semiconductores tipo N, debido a la atracción de cargas de diferentes signos, mientras que los portadores mayoritarios, huecos de los elementos semiconductores P, emigran hacia la terminal negativa que se encuentra en cada uno de sus extremos. Esta ausencia de cargas en cada elemento semiconductor cerca de la unión metal – semiconductor provoca un enrarecimiento de cargas y el consecuente descenso de temperatura en el área circundante. Por otro lado, la compresión o acumulación de portadores cerca de la unión metal – semiconductor en la parte baja de los elementos semiconductores, provoca un ascenso de temperatura. Este comportamiento nos permite afirmar que si invertimos la polaridad de la fuente de alimentación, la cara fría de la celda, ahora calentará y la cara caliente sufrirá un descenso de temperatura.



Figura 3-45. Algunos tipos de módulos Peltier.

CAPÍTULO 4: AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Uno de los dispositivos más usados en el diseño de equipo electrónico es el amplificador operacional (OPAM). Esto se debe a su versatilidad en el acondicionamiento de señales para realizar operaciones aritméticas como la suma, la resta, la división y la multiplicación. Permite además generar operaciones más complicadas como la integración, la derivación, el logaritmo y el antilogaritmo. Además los amplificadores operacionales se usan ampliamente en el filtrado de señales como paso banda, paso baja, paso alta y supresor; todo esto con diferentes aproximaciones como Butterworth, Chebyshev y Bessel. También se emplean en la conversión de señales analógicas a digitales y viceversa, así como en las conversiones de corriente a voltaje y de voltaje a corriente. Se usa en la generación de señales periódicas como senoidales, triangulares y trenes de pulsos. En fin el amplificador operacional es uno de los dispositivos más importantes en el área de la electrónica.

Los diseños varían entre cada fabricante y cada producto, pero todos los amplificadores operacionales tienen básicamente la misma estructura interna que consiste en tres bloques principales: (1) Amplificador diferencial, (2) Etapa de ganancia y (3) Etapa de salida.



Figura 4-1. Etapas de la estructura interna de un amplificador operacional.

1.- *Amplificador Diferencial.* El amplificador diferencial tiene como característica amplificar la diferencia de dos señales de entrada. Esto ofrece una gran ventaja, dado que al amplificar la diferencia de dos señales, el ruido común a ambas es atenuado.

2.- *Etapa de Ganancia.* La etapa de ganancia amplifica la señal generada por el par diferencial.

3.- *Etapa de Salida.* La etapa de salida tiene como función permitir una baja impedancia de salida y de esta forma proporcionar de ser necesario una corriente de carga moderada. Usualmente presenta protección frente a cortocircuitos.

A continuación se muestra el símbolo del amplificador operacional, es un triángulo que apunta en la dirección del flujo de la señal. Este componente tiene un número de identificación de parte (NIP) colocado dentro del símbolo del triángulo.

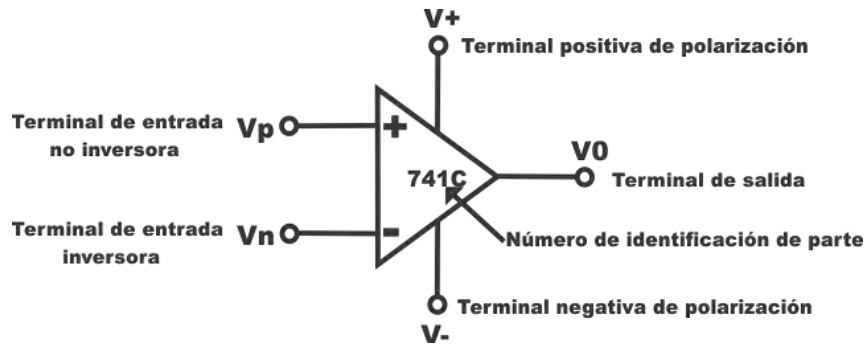


Figura 4-2. Símbolo del circuito que representa a un amplificador operacional de propósito general.

Como su nombre lo indica, los amplificadores operacionales se encargan de amplificar las señales eléctricas que tienen a la entrada. El amplificador sólo responde a la diferencia de tensión entre las dos terminales de entrada, no a su potencial común. Una señal positiva en la entrada inversora (-), produce una señal negativa a la salida, mientras que la misma señal en la entrada no inversora (+) produce una señal positiva a la salida. Así pues con una tensión de entrada diferencial, V_d , la tensión de salida V_o , está dada por la siguiente ecuación:

$$V_o = AV_d$$

Donde A es la ganancia del amplificador. Ambas terminales de entrada se utilizan siempre, independientemente de la aplicación. La señal de salida es de una sola terminal y está referida a tierra (cero volts), por consiguiente, se utilizan dos tensiones de alimentación bipolares (+ y -).

Teniendo en mente estas funciones de la entrada y salida, se pueden definir las propiedades del amplificador ideal.

- **Impedancia de entrada infinita (Z_i).** Es la resistencia que existe entre las terminales V_n y V_p . Si R_i es infinita se puede conectar cualquier señal en las entradas del amplificador operacional, sin importar que la fuente que genera la señal, suministre corrientes muy pequeñas.
- **Impedancia de salida cero (Z_o).** De esta resistencia depende la corriente que se pueda suministrar, de tal forma que si R_o es cero, al amplificador operacional se le puede conectar cualquier tipo de carga.
- **Slew Rate infinito (SR).** Es la velocidad con la que puede responder el amplificador operacional ante los cambios en su entrada. Si el SR es infinito, se tiene la certeza de que el amplificador responderá de manera instantánea.

- **Ancho de banda infinito (BW).** Las limitaciones en frecuencia de un amplificador operacional están dadas por el ancho de banda, por lo tanto un BW infinito no permitirá trabajar en cualquier intervalo de frecuencias.
- **Corriente de bias cero (I_b).** Las corrientes de bias son las que circulan por las terminales inversora y no inversora del amplificador operacional, generalmente se toma el promedio de ambas para definir el valor de I_b , así pues si I_b es cero el amplificador no demanda corriente alguna en las terminales V_n y V_p .
- **Corriente de offset de entrada cero (I_{IO}).** La corriente de offset es la diferencia que se tiene de las corrientes de bias. Si I_{IO} es cero, significa que las corrientes de bias están balanceadas y esto nos asegura que cuando $V_n = V_p = 0$, el voltaje de salida del operacional también será cero.
- **Voltaje de offset de entrada cero (V_{IO}).** Es el voltaje de ajuste que se le debe de aplicar a una de las terminales de entrada cuando la otra se encuentre conectada a un potencial cero, a fin de garantizar un voltaje en la salida de cero volts.
- **Ganancia de lazo abierto infinita (A_{OL}).** Cuando un amplificador operacional trabaja con realimentación negativa, permite un control total del comportamiento de la ganancia del propio operacional, por lo que una ganancia infinita de lazo abierto facilita el análisis de los amplificadores operacionales.

Amplificador operacional real

Las características del amplificador operacional ideal no pueden alcanzarse en los componentes reales, pero de todos modos se aproximan a ellas, de la siguiente manera:

| Amplificadores operacionales ideales | | | Amplificadores operacionales reales (ejemplos) | |
|--------------------------------------|----------|----------|--|--|
| Ganancia de lazo abierto | A_{OL} | Infinita | 200000 (LM741) | 200000 (TL081) |
| Impedancia de entrada | Z_i | Infinita | 2[M Ω] (LM741) | 10 ⁶ [M Ω] (TL081) |
| Impedancia de salida | Z_O | 0 | 75[Ω] (LM741) | 50[Ω] (TL081) |
| Ancho de banda | BW | Infinito | 1.5[MHz] (LM741) | 4[MHz] (TL081) |

Tabla 4-1. Comparación entre las principales características de los amplificadores operacionales ideales y reales.

Encapsulado

El amplificador operacional es un dispositivo muy común en el mercado y que suele presentarse en forma de circuito integrado en diferentes encapsulados, entre los que se encuentran el encapsulado de caja metálica (figura a), los conocidos encapsulados doble en línea (DIP) de 8 y 14 terminales (figuras b y c) y los encapsulados de tipo montaje superficial (SMT) (figura d).

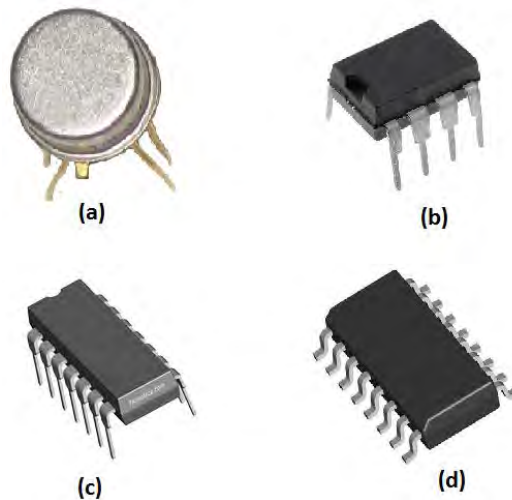


Figura 4-3. Encapsulados más comunes de los amplificadores operacionales.

4.1 Topologías básicas del amplificador operacional

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones (1) inversora y (2) no inversora. Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas, con las cuales se pueden proporcionar diversas características de operación. A continuación se presentan algunas de las conexiones de los circuitos más comunes.

4.1.1 Seguidor de tensión

En esta topología la señal de entrada es igual a la señal de salida ($V_i = V_o$), es decir la señal de entrada sigue a la de la salida, de aquí su nombre de seguidor. No se tiene consumo de corriente a la entrada (corriente de entrada despreciable) puesto que la impedancia es elevadísima. La tensión a la salida la proporciona el amplificador operacional.

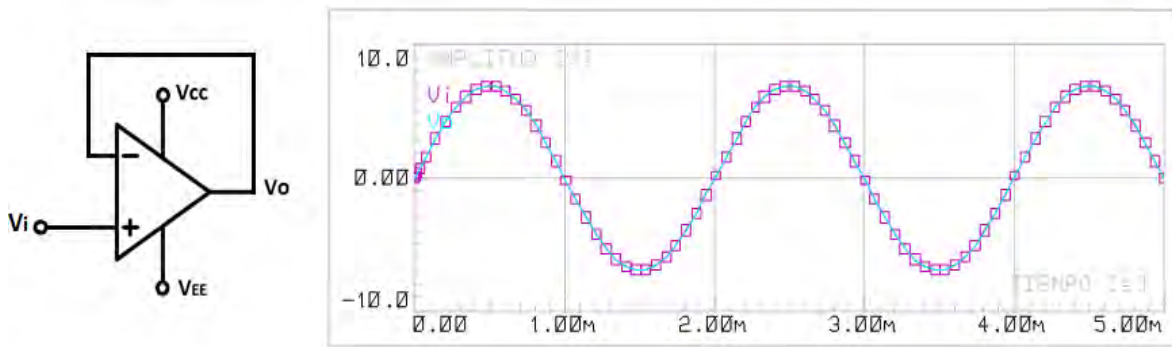


Figura 4-4. Símbolo del amplificador seguidor y su gráfica.

4.1.2 Amplificador inversor

Esta topología permite amplificar o atenuar la señal de entrada V_i . La señal de salida V_o está desfasada 180° con respecto a la señal de entrada (la señal está invertida), de aquí su nombre de inversor. Dado que $V_n = V_p = 0$, se dice que el circuito tiene una tierra virtual² en la terminal inversora V_n .

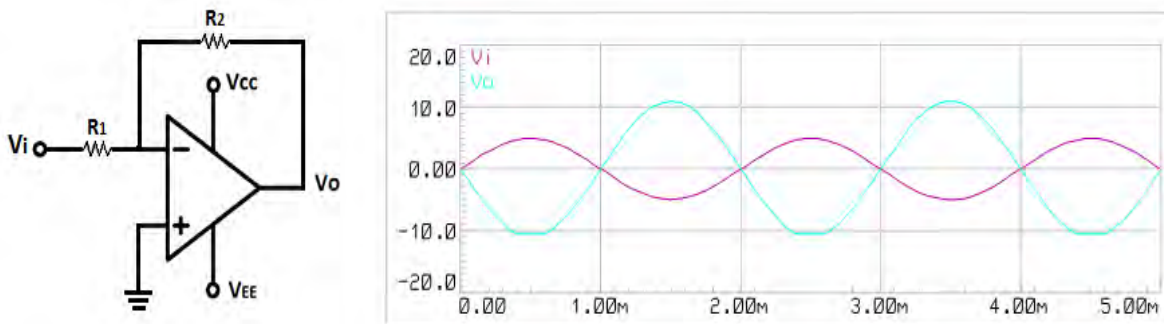


Figura 4-5. Símbolo y gráfica del amplificador inversor.

4.1.3 Amplificador no inversor

Esta topología permite amplificar, pero no atenuar la señal de entrada V_i . La señal de salida V_o está en fase con respecto a la señal de entrada V_i (la señal no está invertida), de aquí su nombre de no inversor. En este circuito no se tiene tierra virtual, aunque $V_n = V_p$, se observa que V_p es diferente de cero ($V_p = V_i$).

² Una tierra virtual es aquel punto que tiene un potencial eléctrico de cero volts pero que no está conectado físicamente a la terminal de tierra.

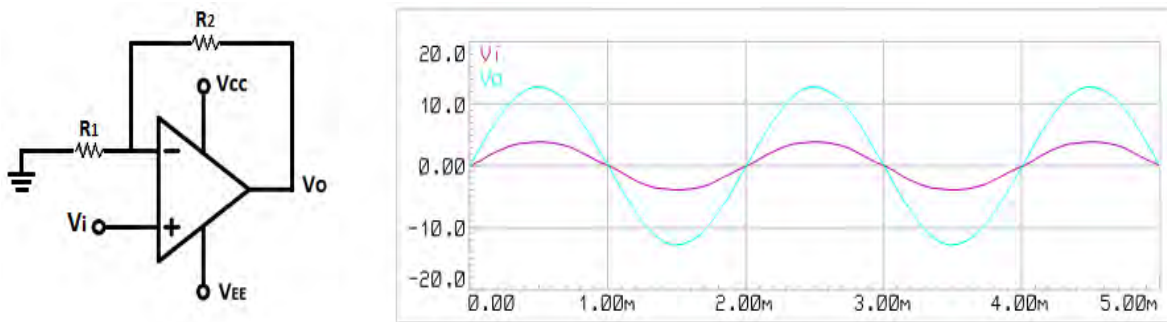


Figura 4-6. Símbolo y gráfica del amplificador operacional en configuración no inversor.

4.1.4 Amplificador sumador inversor

Esta topología permite amplificar o atenuar la suma de las señales de entrada (V_A, V_B, \dots, V_X). La señal de salida V_o , está desfasada 180° con respecto a la suma de las señales de entrada (la señal está invertida), de aquí su nombre de sumador inversor. Dado que $V_n = V_p = 0$, se dice que el circuito tiene una tierra virtual en la terminal inversora.

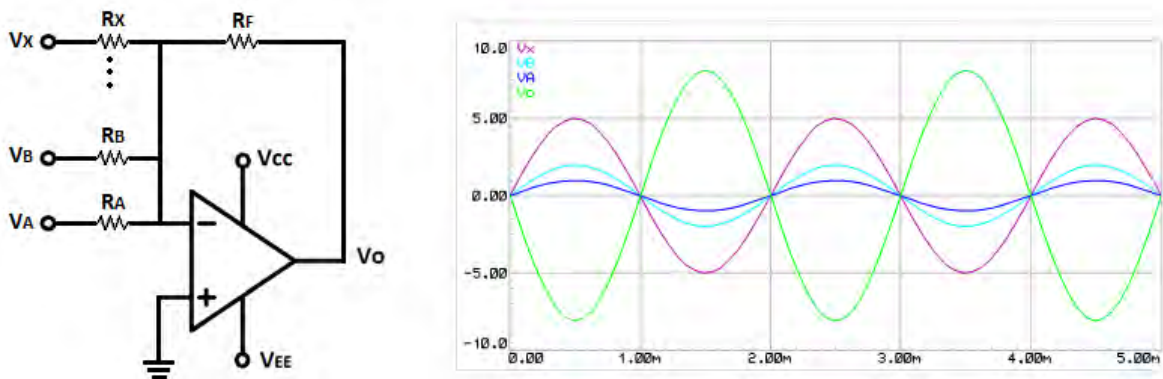


Figura 4-7. Símbolo del amplificador sumador y su gráfica.

4.1.5 Amplificador diferencial

Esta topología permite amplificar o atenuar la diferencia de las señales de entrada (V_1 y V_2), de aquí su nombre de amplificador diferencial. Este tipo de configuración es adecuado cuando las señales de entrada aportan suficiente corriente, esto se debe a que la impedancia a la entrada del circuito (no del amplificador operacional), no es infinita.

Para que la diferencia de las señales sea lo más precisa, es necesario que las condiciones de $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$ se cumplan lo mejor posible. Por esta razón se sugiere que la tolerancia de las resistencias sea menor o igual al 1%.

En este circuito no se tiene tierra virtual, aunque $V_n = V_p$, se observa que V_p depende de V_2 .

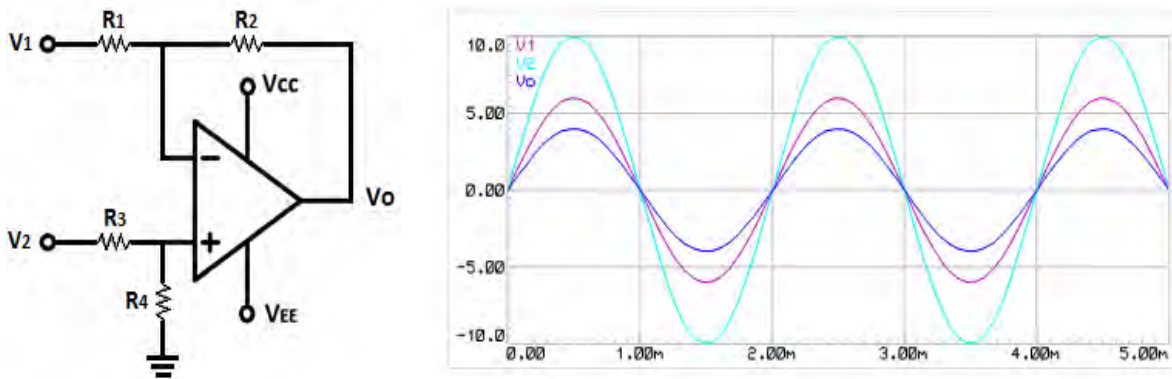


Figura 4-8. Símbolo del amplificador diferencial y su gráfica en donde se observa que la señal de salida V_o , es la diferencia de las entradas V_1 y V_2 .

4.1.6 Amplificador integrador ideal

Esta topología permite obtener la integral de la señal de entrada V_i . La señal de salida está desfasada 180° con respecto a la señal de entrada V_i (la señal está invertida). Este circuito tiene una tierra virtual en la terminal inversora.

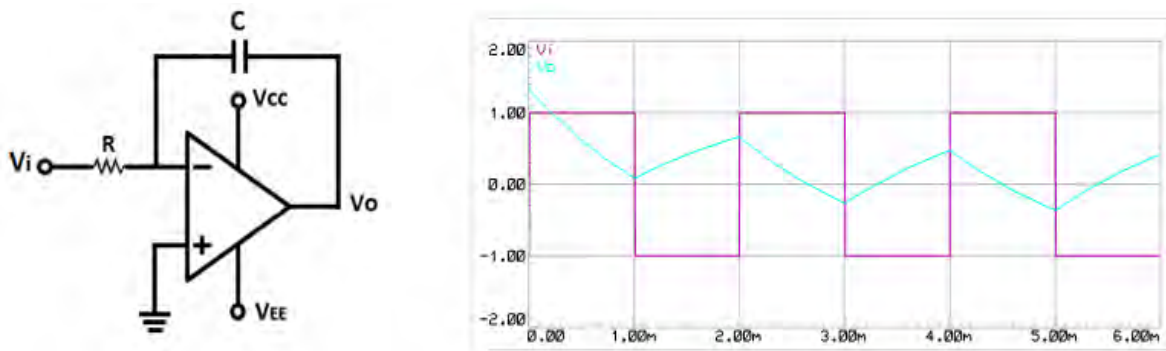


Figura 4-9. Símbolo del amplificador integrador y gráfica en la que se observa que la señal de salida V_o es la forma de onda que corresponde a la integral de la señal cuadrada de la entrada.

4.1.7 Amplificador derivador ideal

Esta topología permite obtener la derivada de la señal de entrada V_i . La señal de salida está desfasada 180° con respecto a la señal de entrada V_i (la señal está invertida).

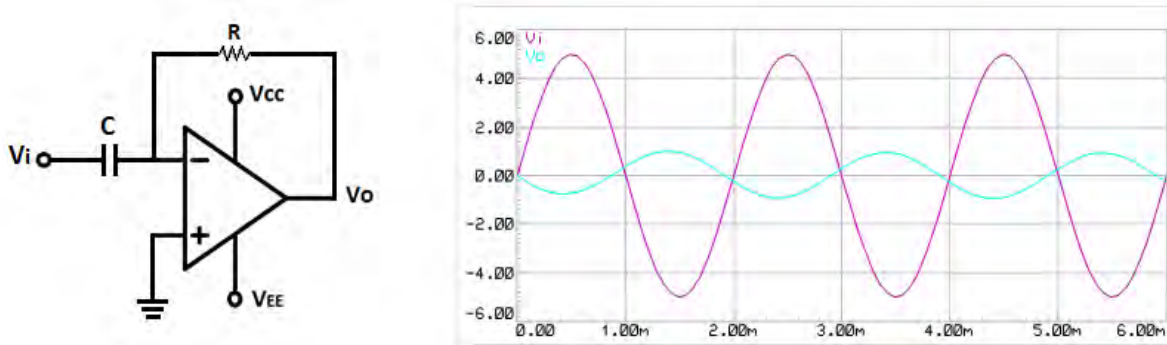


Figura 4-10. Símbolo del amplificador derivador en cuya gráfica se observa que la señal de salida V_o , corresponde a una función coseno, que es la derivada de la señal senoidal de la entrada V_i .

4.2 Circuitos comparadores

Un comparador es un circuito electrónico, ya sea analógico o digital, capaz de comparar una señal de entrada con un determinado valor, variando su salida según el resultado.

Los comparadores están compuestos por amplificadores operacionales diseñados especialmente para comparar un nivel de voltaje con otro y el cambio en el voltaje de salida cuando un voltaje de entrada es mayor que otro. Cualquier amplificador operacional se puede usar como comparador, pero los comparadores diseñados especialmente disminuyen los problemas de aplicación.

Un comparador debe tener poco voltaje de desajuste, funcionamiento estable libre de oscilación y poca corriente de polarización. En muchas aplicaciones con varios comparadores, la operación con una sola fuente es una gran ventaja.

Los comparadores son parte integrante de la prueba automática, de la conversión analógico a digital, de la regulación de fuentes de poder (como amplificadores de error) y de la conmutación a nivel de circuitos lógicos.

Desafortunadamente el voltaje de salida del amplificador operacional no cambia con mucha velocidad. Además su salida cambia, entre los límites fijados por los voltajes de saturación, $+V_{sat}$ y $-V_{sat}$, alrededor de $\pm 13[V]$. Por tanto, su salida no puede alimentar dispositivos como circuitos integrados de lógica digital TTL, que requieren niveles de voltaje entre 0 y $+5[V]$.

4.2.1 Comparador de voltaje básico

Si un Amplificador Operacional no presenta algún tipo de realimentación negativa, el circuito se considera como un circuito comparador. Como su nombre lo indica, este circuito compara las dos señales presentes en sus entradas V_p y V_n . El voltaje de salida del circuito queda definido por la siguiente ecuación:

$$V_o = A_{OL} (V_p - V_n)$$

En donde A_{OL} es la ganancia en lazo abierto con un valor infinito. Si la diferencia $V_p - V_n$ es positiva, el circuito genera un voltaje máximo positivo acotado por la fuente de polarización V_{CC} . Si la diferencia es negativa el voltaje de salida toma el valor de la fuente V_{EE} .

Existen dos comparadores básicos:

El comparador inversor. En este tipo de comparador la señal de entrada se conecta en la terminal inversora, en tanto que la no-inversora se mantiene a cero volts o a un potencial fijo de DC.

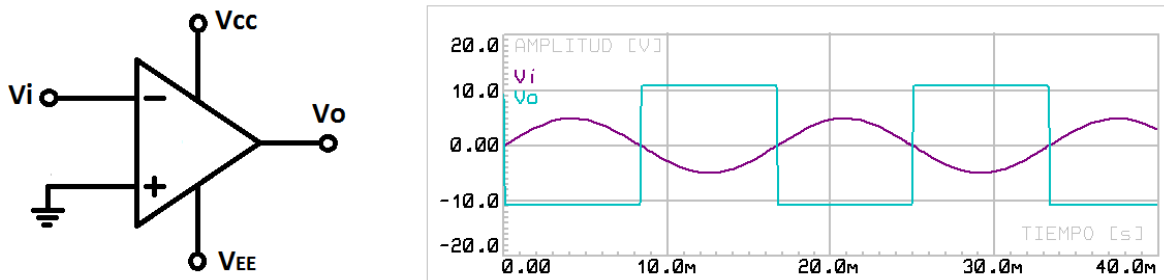


Figura 4-11. El comparador inversor y su gráfica.

El comparador no-inversor. En el comparador no inversor la señal de entrada se aplica a la terminal no inversora, en tanto que la terminal V_n se mantiene en un potencial constante.

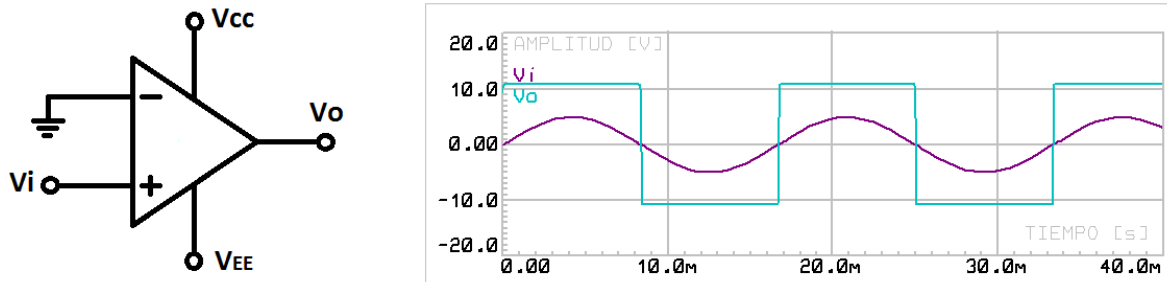


Figura 4-12. El comparador no inversor y su gráfica.

La salida puede tomar sólo dos valores, en el caso ideal de un operacional, estos son V_{CC} y V_{EE} ; sin embargo en circuitos reales los voltajes de salida máximos se ven limitados a uno o dos volts por debajo de su alimentación.

Este tipo de circuitos son bastantes simples y poco eficaces ante la presencia de ruido, ya que la respuesta del comparador presenta disparos en falso debido a la constante oscilación de la señal de entrada. Por ejemplo en la gráfica siguiente se tiene una señal de entrada pero con una componente de ruido.

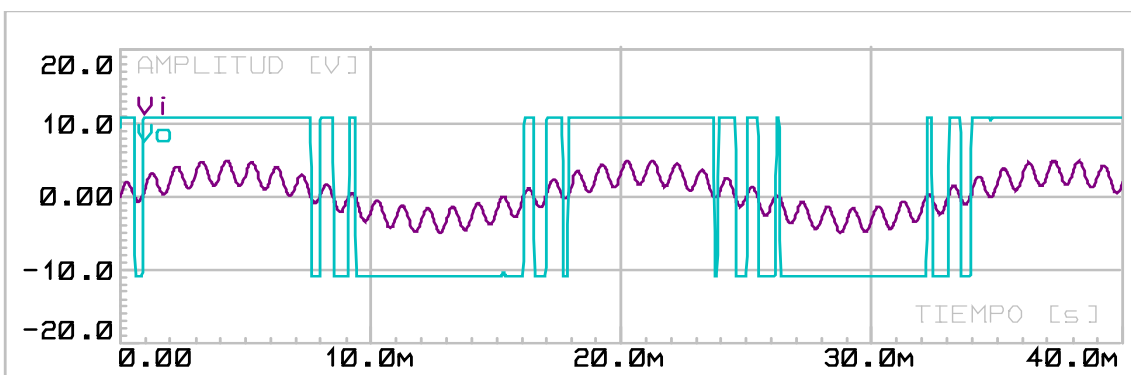


Figura 4-13. Disparos en falso debidos a la presencia de ruido en la respuesta del comparador.

En la práctica la eliminación de disparos en falso se corrige empleando comparadores con histéresis.

Los circuitos comparadores con histéresis, también denominados disparador de Schmitt, presentan una característica entrada-salida que depende del sentido de variación de la señal de entrada. Su símbolo y la característica entrada-salida ideal de un comparador de este tipo son los siguientes:

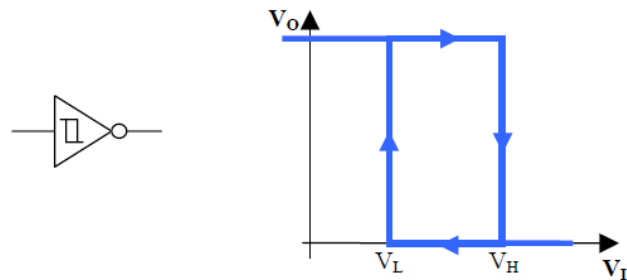


Figura 4-14. Símbolo y característica entrada-salida de un comparador con histéresis.

Si la tensión de entrada (V_i) empieza a crecer desde un valor igual a cero, la salida (V_o) se mantiene a un nivel alto hasta que la entrada alcanza un valor V_H . Si se recorre el camino en sentido contrario, es decir, desde un valor alto se va disminuyendo la tensión, la salida se mantiene a un nivel bajo mientras la entrada sea superior a V_L .

Esta diferencia entre los umbrales de comparación para los que se produce un cambio brusco de la señal de salida se llama histéresis.

Las variaciones que ocurren entre los umbrales V_H y V_L no alteran el estado del comparador; es decir, si estas variaciones corresponden a una señal de ruido, el comparador no presentará disparos en falso.

Las configuraciones básicas de comparador Schmitt Trigger son el comparador Inversor con histéresis y el no-inversor con histéresis.

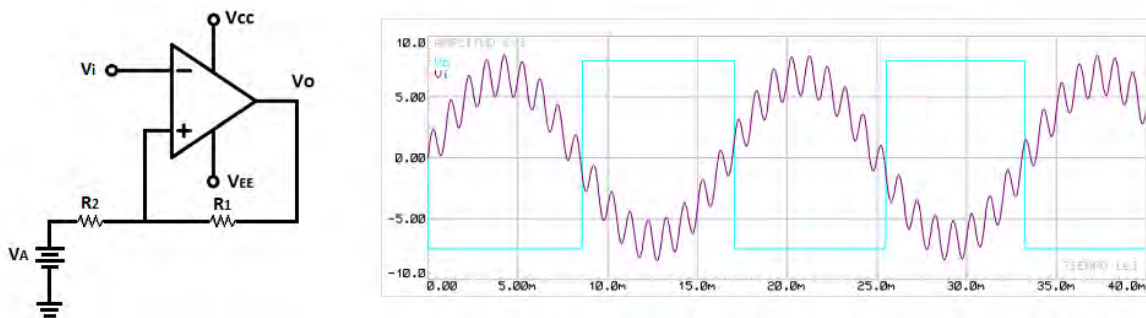


Figura 4-15. Configuración y gráfica de comparador inversor Schmitt Trigger.

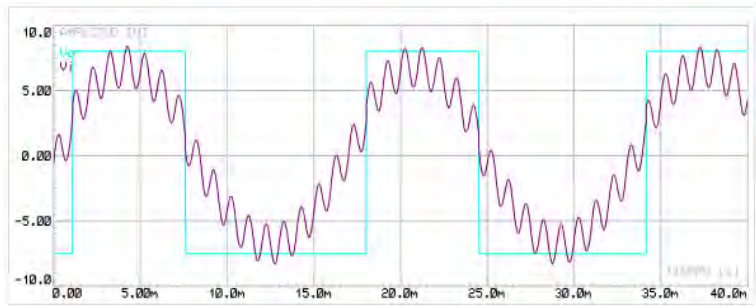
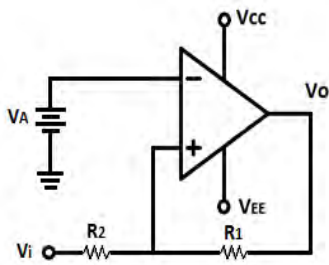


Figura 4-16. Configuración y gráfica de comparador no-inversor Schmitt Trigger.

4.2.2 Comparador de ventana

Un comparador de ventana es un circuito que permite determinar si una tensión de entrada está comprendida dentro de un rango de tensiones. El circuito puede ser construido fácilmente mediante dos comparadores y dos tensiones de referencia que definen el límite superior V_{UL} y el límite inferior V_{LL} . Dependiendo del tipo de configuración la salida tendrá un estado si está fuera de estos límites y otro si está adentro.

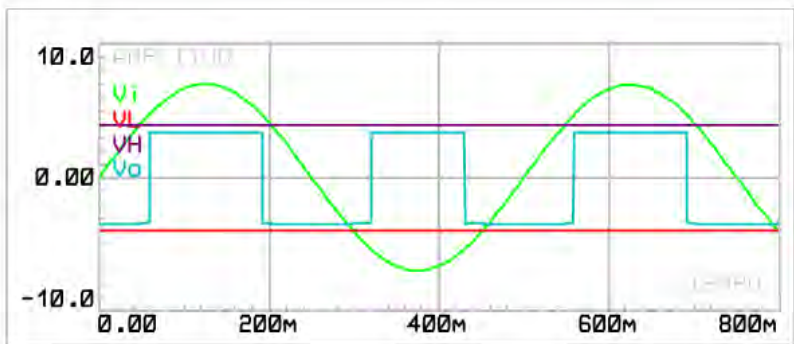
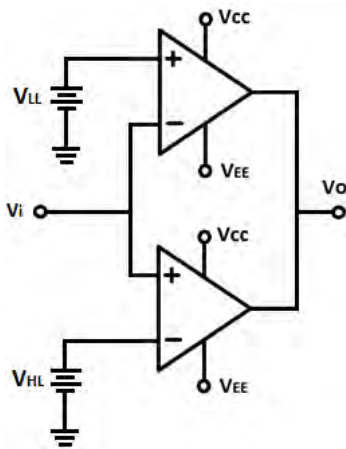


Figura 4-17. Comparador de ventana inversor y gráfica en la cual se observa que la salida está en nivel bajo cuando la entrada está en los límites de la ventana.

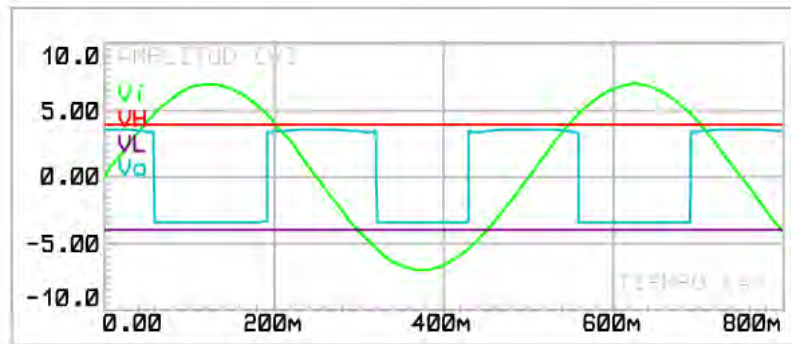
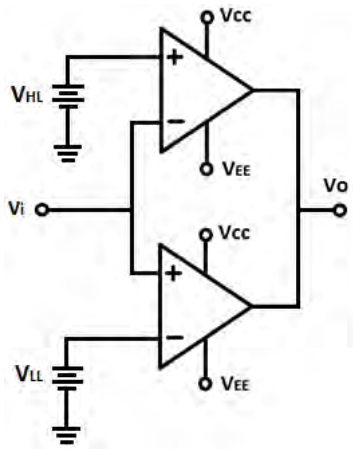


Figura 4-18. Comparador de ventana no inversor y gráfica en la cual se observa que la salida está en nivel alto cuando la señal de entrada está dentro de los límites de la ventana.

CAPÍTULO 5: CONTROLADORES

Un controlador es un programa informático que permite al sistema operativo interactuar con un periférico, haciendo una abstracción del hardware y proporcionando una interfaz para usarlo. Se puede esquematizar como un manual de instrucciones que le indica al sistema operativo, cómo debe controlar y comunicarse con un dispositivo en particular.

Existen tantos tipos de controladores como tipos de periféricos y es posible encontrar más de un controlador posible para el mismo dispositivo, cada uno ofreciendo un nivel distinto de funcionalidades. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un circuito integrado, el cual recibe el nombre de microcontrolador, el cual consiste principalmente en una completa microcomputadora contenida en el corazón de un circuito integrado.

Los microcontroladores se pueden encontrar en innumerables cantidades de dispositivos ya que son la parte central del control de diversos sistemas electrónicos y se diseñan tanto para aplicaciones específicas como generales.

Quizá la clasificación más importante entre los microcontroladores sea de 4, 8, 16 ó 32 bits, siendo los de 8 bits los que dominan el mercado y los de 4 se resisten a desaparecer. La razón de esta tendencia es que los microcontroladores de 4 y 8 bits son apropiados para la gran mayoría de las aplicaciones, lo que hace absurdo emplear micros más potentes y por consecuencia de mayor costo.

En cuanto a las técnicas de fabricación, prácticamente la totalidad de los microcontroladores actuales se fabrican con tecnología CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Esta técnica supera a las anteriores debido a su bajo consumo y alta inmunidad al ruido.

5.1 Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador. Un microcontrolador dispone de los siguientes componentes:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital /Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

Aumento de prestaciones. Un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.

Aumento de la fiabilidad. Al reemplazar el microcontrolador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisa menos ajustes.

Reducción del tamaño en el producto terminado. La integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.

Mayor flexibilidad. Las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

Si sólo se dispusiese de un modelo de microcontrolador, éste debería tener, muy potenciados todos sus recursos para poderse adaptar a las exigencias de las diferentes aplicaciones. En la práctica cada fabricante de microcontroladores oferta un elevado número de modelos diferentes, desde los más sencillos hasta los más complejos. Es posible seleccionar la capacidad de las memorias, el número de líneas E/S, la cantidad y potencia de los elementos auxiliares, la velocidad de funcionamiento, etc. Por todo ello un aspecto muy destacado del diseño es la selección del microcontrolador a utilizar.

A la hora de escoger el microcontrolador a emplear en un diseño en concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.).

Antes de seleccionar un microcontrolador es imprescindible analizar los requisitos de aplicación:

- **Procesamiento de datos.** Puede ser necesario que el microcontrolador realice cálculos críticos en un tiempo limitado. En ese caso debemos de asegurarnos de seleccionar un dispositivo suficientemente rápido para ello. Por otro lado, habrá que tener en cuenta la precisión de los datos a manejar: si no es suficiente con un microcontrolador de 8 bits, puede ser necesario acudir a microcontroladores de 16 o 32 bits, o incluso a hardware de coma flotante.
- **Entrada/Salida.** Para determinar las necesidades de E/S del sistema es conveniente dibujar un diagrama de bloques del mismo, de tal forma que sea sencillo identificar la cantidad y tipo de señales a controlar. Una vez realizado ese análisis puede ser necesario añadir periféricos externos o cambiar a otro microcontrolador más adecuado a ese sistema.
- **Consumo.** Algunos productos que incorporan microcontroladores están alimentados con baterías y su funcionamiento puede ser tan vital como activar una alarma antirrobo. Lo más conveniente en un caso como este puede ser que el microcontrolador esté en un estado de bajo consumo pero que se active ante la presencia de una señal y ejecute el programa adecuado para procesarla.
- **Memoria.** Para detectar las necesidades de memoria de nuestra aplicación, debemos separarla en memoria volátil (RAM), memoria no volátil (ROM, EPROM, etc.) y memoria no volátil modificable (EEPROM).

- Ancho de palabra. El criterio de diseño debe ser seleccionar el microcontrolador de menor ancho de palabra que satisfaga los requerimientos de la aplicación.
- Diseño de la placa. La selección de un microcontrolador en concreto condicionará el diseño de la placa de circuitos. Debe tenerse en cuenta que quizá usar un microcontrolador barato encarezca el resto de los componentes del diseño.

Los microcontroladores más populares se encuentran, sin duda, entre las mejores elecciones:

8048 (INTEL).- Es el padre de los microcontroladores actuales, el primero de todos. Su precio, disponibilidad y herramientas de desarrollo hacen que todavía sea muy popular.

8051 (INTEL Y OTROS).- Es sin duda el microcontrolador más popular. Fácil de programar, pero potente. Está bien documentado y posee cientos de variantes e incontables herramientas de desarrollo.

80186, 80188 y 80386 EX (INTEL).- Versiones en microcontrolador de los populares 8086 y 8088. Su principal ventaja es que permiten aprovechar las herramientas de desarrollo para las PC's.

68HC11 (MOTOROLA Y TOSHIBA).- Es un microcontrolador de 8 bits potente y popular con gran cantidad de variantes.

683xx (MOTOROLA).- Surgido a partir de la popular familia 68k, a la que se incorporan algunos periféricos. Son microcontroladores de altísimas prestaciones.

PIC (MICROCHIP).- Familia de microcontroladores que ganan popularidad día a día. Fueron los primeros microcontroladores RISC.

5.2 Los microcontroladores PIC

Los PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. El nombre actual no es un acrónimo, en realidad el nombre completo es PICmicro que se utiliza generalmente como Peripheral Interface Controller (controlador de interfaz periférico)

Con las gamas de PIC se dispone de gran diversidad de modelos y encapsulados, pudiendo seleccionar el que mejor se acople a las necesidades de acuerdo con el tipo y capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S y las funciones auxiliares precisas.

Características relevantes

1.- La arquitectura del procesador sigue el modelo Harvard. En esta arquitectura, el CPU se conecta de forma independiente y con buses distintos, con la memoria de instrucciones y con la de datos.

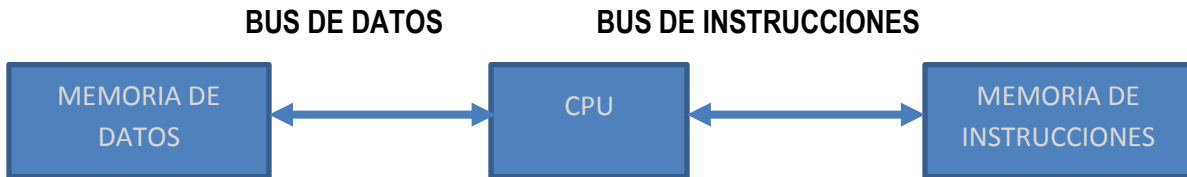


Figura 5-1. Arquitectura Harvard.

La arquitectura Harvard permite al CPU acceder simultáneamente a las dos memorias. Además, propicia numerosas ventajas al funcionamiento del sistema.

2.- Se aplica la técnica de segmentación (pipe-line) en la ejecución de las instrucciones. La segmentación permite al procesador realizar al mismo tiempo la ejecución de una instrucción y la búsqueda del código de la siguiente. De esta forma se puede ejecutar cada instrucción en un ciclo (un ciclo de instrucción equivale a cuatro ciclos de reloj).

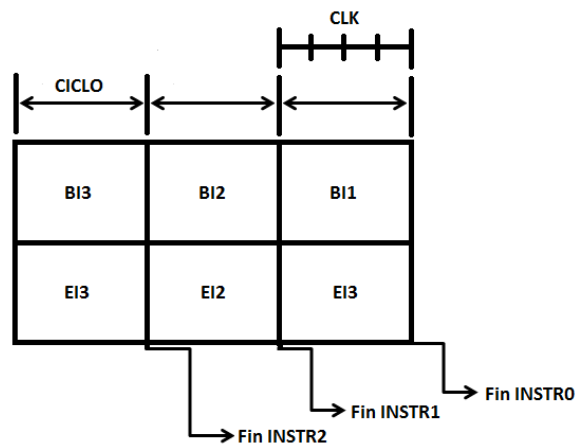


Imagen 5-2. Equivalencia de un ciclo de instrucción a cuatro ciclos de reloj.

Las instrucciones de salto ocupan dos ciclos de reloj al no conocer la dirección de la siguiente instrucción hasta que no se haya completado la de bifurcación.

3.- El formato de todas las instrucciones tienen la misma longitud. Todas las instrucciones de los microcontroladores de la gama baja tienen una longitud de 12 bits. Las de la gama media tienen 14

bits y más las de la gama alta. Esta característica es muy ventajosa en la optimización de la memoria de instrucciones y facilita enormemente la construcción de ensambladores y compiladores.

4.- Procesador RISC (Computador con un conjunto de instrucciones reducido).

Los modelos de la gama baja disponen de un repertorio de 33 instrucciones, 35 los de la gama media y casi 60 los de la alta.

5.- Todas las instrucciones son ortogonales.

Cualquier instrucción puede manejar cualquier elemento de la arquitectura como fuente o como destino.

6.- Arquitectura basada en un banco de registros.

Esto significa que todos los objetos del sistema (puertos de E/S, temporizadores, posiciones de memoria, etc.) están implementados físicamente como registros.

7.- Diversidad de modelos de microcontroladores con prestaciones y recursos diferentes.

La gran variedad de modelos de microcontroladores PIC permite que el usuario pueda seleccionar el más conveniente para su proyecto.

8.- Herramientas de soporte potentes y económicas.

La empresa Microchip y otras que utilizan los PIC ponen a disposición de los usuarios numerosas herramientas para desarrollar hardware y software. Son muy abundantes los programadores, los simuladores, software, los emuladores en tiempo real, ensambladores, compiladores C, intérpretes y compiladores BASIC, etc.

Microchip construye diversos modelos de microcontroladores orientados a cubrir las necesidades de cada proyecto. Así pues, hay microcontroladores disponibles sencillos y baratos para atender las aplicaciones simples y otros complejos y más costosos para los de grandes aplicaciones.

Entre los fabricantes de microcontroladores existen dos tendencias para resolver las demandas de los usuarios:

5.2.1 Microcontroladores de arquitectura cerrada

Cada modelo se construye con un determinado CPU, cierta capacidad de memoria de datos, cierto tipo y capacidad de memoria de instrucciones, un número de puertos de E/S y un conjunto de recursos auxiliares muy concreto. El modelo no admite variaciones ni ampliaciones.

La aplicación a la que se destina debe encontrar en su estructura todo lo que precisa y, en caso contrario, hay que desecharlo. Microchip ha elegido principalmente este modelo de arquitectura.

5.2.2 Microcontroladores de arquitectura abierta

Estos microcontroladores se caracterizan porque, además de disponer de una estructura interna determinada, pueden emplear sus líneas de E/S para sacar al exterior los buses de datos, direcciones y control, con lo que se posibilita la ampliación de la memoria y las E/S con circuitos integrados externos. Microchip dispone de modelos PIC con arquitectura abierta, sin embargo, esta alternativa se escapa de la idea de un microcontrolador incrustado y se asemeja a la solución que emplean los clásicos microprocesadores.

La mayoría de los sistemas de control incrustados requieren CPU, memoria de datos, memoria de instrucciones, líneas de E/S, y diversas funciones auxiliares como temporizadores, comunicación serie y otras. Estos parámetros dependen de la aplicación y varían mucho de una situación a otra. Quizá se pueda considerar la decisión más importante a la elección del modelo de microcontrolador a usar, por lo que Microchip oferta cuatro gamas de microcontroladores de 8 bits: gama mini, gama baja, gama media y gama alta.

Gama Mini

Esta gama con encapsulado de ocho pines, tiene como principal característica su reducido tamaño, al disponer todos sus componentes de solamente ocho pines. Se alimenta con un voltaje de corriente continua comprendido entre 2.5 [V] y 5.5 [V], y requieren menos de 2 [mA] cuando trabajan a 5 [V] y 4 [MHz]. El formato de sus instrucciones puede ser de 12 o 14 bits y su repertorio es de 33 ó 35 instrucciones, respectivamente.

| Modelo | Memoria de programa | Memoria de datos | Frecuencia máxima | Líneas de E/S | ADC 8 bits | Temporizadores |
|-----------|---------------------|------------------|-------------------|---------------|------------|----------------|
| PIC12C508 | 512 X 12 | 25 X 8 | 4[MHz] | 6 | | TMRO + WDT |
| PIC12C509 | 1024 X 12 | 41 X 8 | 4[MHz] | 6 | | TMRO + WDT |
| PIC12C670 | 512 X 14 | 80 X 8 | 4[MHz] | 6 | | TMRO + WDT |
| PIC12C671 | 1024 X 14 | | 4[MHz] | 6 | 2 | TMRO + WDT |
| PIC12C672 | 2048 X 14 | | 4[MHz] | 6 | 4 | TMRO + WDT |
| PIC12C680 | 512 X 12 FLASH | | 4[MHz] | 6 | 4 | TMRO + WDT |
| PIC12C681 | 1024 X 14 FLASH | | 4[MHz] | 6 | | |

Tabla 5-1. Características de algunos tipos de PIC's de la Gama Mini.

A pesar de tener solo 8 pines, se pueden destinar hasta 6 PIC's de la gama mini como E/S para los periféricos porque disponen de un oscilador RC, lo cual es una de sus principales características.

Los modelos 12C5xx pertenecen a esta gama, siendo el tamaño de las instrucciones de 12 bits; mientras que los 12C6xx son de la gama media y sus instrucciones tienen 14 bits. Los modelos

12F6xx poseen memoria Flash para el programa y EEPROM para los datos. Algunos modelos disponen de conversores Analógico/Digital de 8 bits incorporados.

Gama Baja

La gama baja o básica consiste en una serie de PIC de recursos limitados, pero con una de las mejores relaciones costo/prestaciones de la familia. Sus versiones están encapsuladas con 18 y 28 patitas y pueden alimentarse a partir de una tensión de 2,5[V], lo que les hace ideales en las aplicaciones que funcionan con baterías teniendo en cuenta su bajo requerimiento de corriente (menos de 2 [mA] a 5 [V] y 4 [MHz]). Tienen un repertorio de 33 instrucciones cuyo formato consta de 12 bits. Al igual que todos los miembros de la familia PIC16/17, los componentes de la gama baja se caracterizan por poseer los siguientes recursos: Sistema “Power On Reset”, Perro guardián (Watchdog o WDT), Código de protección, etc.

| Modelo | Memoria de programa | Memoria de datos | Frecuencia máxima | Líneas de E/S | Temporizadores | Pines |
|------------|---------------------|------------------|-------------------|---------------|----------------|-------|
| PIC16C52 | 384 | 25 | 4[MHz] | 4 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16C54 | 512 | 25 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16C54A | 512 | 25 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16CR54A | 512 | 25 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16C55 | 512 | 24 | 20[MHz] | 20 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16C56 | 1024 | 25 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16C57 | 2048 | 72 | 20[MHz] | 20 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16CR57B | 2048 | 72 | 20[MHz] | 20 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16C58A | 2048 | 73 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16CR58A | 2048 | 73 | 20[MHz] | 12 | TMRO + WDT | 18 |

Tabla 5-2. Características de algunos PIC's del grupo de la Gama Baja.

Gama Media

La denominada gama media es la más variada y completa de los PIC. Abarca modelos con encapsulado desde 18 hasta 68 pines, cubriendo varias opciones que integran abundantes periféricos. Dentro de esta gama se halla el famoso PIC16F84, quizás el modelo más utilizado en la historia de los microcontroladores.

En esta gama sus componentes añaden nuevas prestaciones a las que poseían los de la gama baja, haciéndoles más adecuados en las aplicaciones complejas. Poseen comparadores de magnitudes analógicas, convertidores A/D, puertos serie y diversos temporizadores.

El repertorio de instrucciones es de 35, de 14 bits cada una y compatible con el de la gama baja. Sus distintos modelos contienen todos los recursos que se precisan en las aplicaciones de los

microcontroladores de 8 bits. También dispone de interrupciones y una pila de 8 niveles que permite el anidamiento de subrutinas.

Encuadrado en la gama media también se halla la versión PIC14C000, que soporta el diseño de controladores inteligentes para cargadores de baterías, pilas pequeñas, fuentes de alimentación y UPS y cualquier sistema de adquisición y procesamiento de señales que requiera gestión de la energía de alimentación. Los PIC 14C000 admiten cualquier tecnología de las baterías como Li-Ion, NiMH, NiCd, Ph y Zinc.

| Modelo | Memoria de programa | Memoria de datos RAM/EEPROM | Canales A/D | Líneas de E/S | Temporizadores | Pines |
|------------|---------------------|-----------------------------|-------------|---------------|----------------|-------|
| PIC16C84 | 1024 EEPROM | 36/64 | | 13 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16F84 | 1024 FLASH | 68/64 | | 13 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16F83 | 512 FLASH | 36/64 | | 13 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16CR84 | 1024 ROM | 68/64 | | 13 | TMRO + WDT | 18 |
| PIC16CR83 | 512 ROM | 36/64 | | 13 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16F872 | 2048 FLASH | 128/64 | 5 | 22 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16F873A | 4096 FLASH | 192/128 | 5 | 22 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16F874A | 4096 FLASH | 192/128 | 8 | 33 | TMRO + WDT | 40/44 |
| PIC16F876A | 8192 FLASH | 368/256 | 5 | 22 | TMRO + WDT | 28 |
| PIC16F877A | 8192 FLASH | 368/256 | 8 | 33 | TMRO + WDT | 40/44 |

Tabla 5-3. Tabla comparativa entre algunos PIC's de la Gama Media.

Gama Alta

La gama alta dispone de chips con 58 instrucciones de 16 bits en el repertorio y que disponen de un sistema de gestión de interrupciones vectorizadas muy potente. También incluyen variados controladores de periféricos, puertos de comunicación serie y paralelo con elementos externos, un multiplicador hardware de gran velocidad y mayores capacidades de memoria, que alcanza los 8 k palabras en la memoria de instrucciones y 454 bytes en la memoria de datos.

Quizás la característica más destacable de los componentes de esta gama es su arquitectura abierta, que consiste en la posibilidad de ampliación del microcontrolador con elementos externos. Para este fin, algunos pines comunican con el exterior las líneas de los buses de datos, direcciones y control, a las que se pueden conectar memorias o controladores de periféricos. Esta facultad obliga a estos componentes a tener un elevado número de pines, comprendido entre 40 y 44.

| Modelo | Memoria de programa | Memoria de datos RAM | Canales A/D 10 bits | Líneas de E/S | Temporizadores | Pines |
|-----------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------|-------|
| PIC17C42A | 2048 | 232 | | 33 | 4 + WDT | 40/44 |
| PIC17C43 | 4096 | 454 | | 33 | 4 + WDT | 40/44 |
| PIC17C44 | 8192 | 454 | | 33 | 4 + WDT | 40/44 |
| PIC17C752 | 8192 | 454 | 12 | 50 | 4 + WDT | 64/68 |
| PIC17C756 | 16384 | 902 | 12 | 50 | 4 + WDT | 64/68 |

Tabla 5-4. Características de algunos integrantes PIC's de la Gama Alta.

Con las cuatro gamas de PIC se dispone de una gran diversidad de modelos y encapsulados, pudiendo seleccionar el que mejor se acople a las necesidades de acuerdo con el tipo y capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S y las funciones auxiliares precisas. Sin embargo, todas las versiones están constituidas alrededor de una arquitectura común, un repertorio mínimo de instrucciones y un conjunto de opciones muy apreciadas, como el bajo consumo y el amplio margen del voltaje de alimentación.

CAPÍTULO 6: DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA

6.1 Sistemas de control

Un sistema de control se define como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen los valores prefijados.

Un sistema de control ideal debe ser capaz de cumplir su objetivo cumpliendo con los siguientes requisitos:

- 1.- Garantizar estabilidad, particularmente ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- 2.- Ser eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido, evitando comportamientos bruscos e irreales.
- 3.- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con la ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y que permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas en el sistema.
- Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y por los valores prefijados, calcula la acción de control.
- Actuador. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

6.1.1 Clasificación de los sistemas de control

Existen múltiples criterios para clasificar los distintos tipos de sistemas de control. Atendiendo a su naturaleza son analógicos, digitales o mixtos; atendiendo a su estructura (número de entradas y salidas) pueden ser clásicos o modernos; atendiendo a su respuesta del sistema pueden ser estables o inestables, etc.

De acuerdo a la estrategia de control que hace referencia a la naturaleza y dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y las variables de control, se distinguen dos tipos de sistemas

en función de la naturaleza de la información para calcular la acción de control del sistema, lazo abierto y lazo cerrado.

6.1.1.1 Sistemas de control de lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción del control se denominan sistemas de control de lazo abierto. En otras palabras en un sistema de control de lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada, es decir, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.



Figura 6-1. Sistema de control de lazo abierto.

6.1.1.2 Sistemas de control de lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control de lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control de lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control de lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

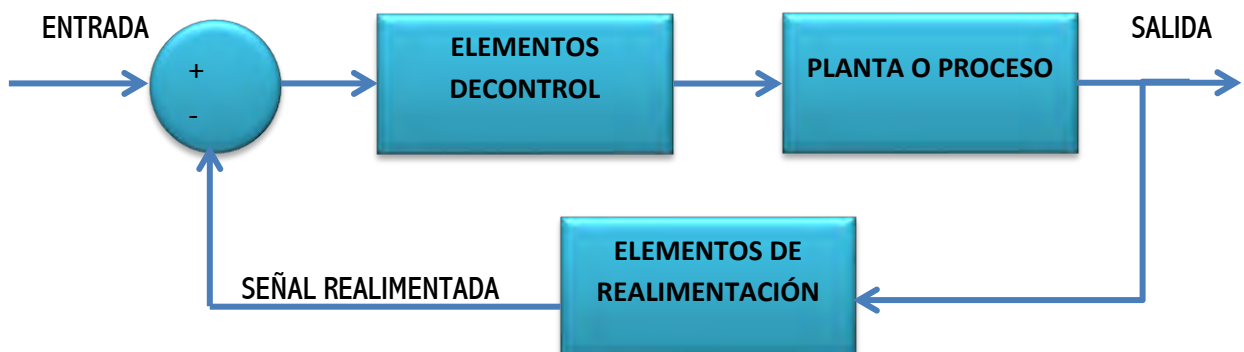


Figura 6-2. Sistema de control de lazo cerrado.

Características de un sistema de control.

- 1.- Señal de corriente de entrada. Es considerada como un estímulo aplicado a un sistema desde una fuente de energía externa con el propósito de que el sistema produzca una respuesta específica.
- 2.- Señal de corriente de salida. Respuesta obtenida por el sistema que puede o no relacionarse con la respuesta que implicaba la entrada.
- 3.- Variable manipulada. Es el elemento al cual se le modifica su magnitud, para lograr la respuesta deseada.
- 4.- Variable controlada. Es el elemento que se desea controlar.
- 5.- Conversión. Se realiza mediante receptores que generan las variaciones o cambios que se producen en la variable.
- 6.- Variaciones externas. Son los factores que influyen en la acción de producir un cambio de orden correctivo.
- 7.- Fuente de energía. Es la que entrega la energía necesaria para generar cualquier tipo de actividad dentro del sistema.
- 8.- Realimentación. La realimentación es una característica importante de los sistemas de control de lazo cerrado. Es una relación secuencial de causas y efectos entre las variables del sistema. Dependiendo de la acción correctiva que tome el sistema, éste puede apoyar o no una decisión, cuando en el sistema se produce un retorno, se dice que existe una realimentación negativa; si el sistema apoya la decisión inicial se dice que existe realimentación positiva.

6.1.2 La Ingeniería en los sistemas de control

Los problemas considerados en la Ingeniería de los sistemas de control, básicamente se tratan mediante dos pasos fundamentales como son:

- 1.- El análisis
- 2.- El diseño

En el análisis se investiga las características de un sistema existente, mientras que en el diseño se escogen los componentes para crear un sistema de control que posteriormente ejecute una tarea particular. Existen dos métodos de diseño:

- 1.- Diseño por análisis
- 2.- Diseño por síntesis

El diseño por análisis modifica las características de un sistema existente o de un modelo estándar del sistema y el diseño por síntesis se define la forma del sistema a partir de sus especificaciones.

La representación de los problemas en los sistemas de control se lleva a cabo mediante tres representaciones básicas o modelos:

- 1.- Ecuaciones diferenciales, integrales, derivadas y otras relaciones matemáticas.
- 2.- Diagramas en bloque.
- 3.- Gráficas en flujo de análisis.

Los diagramas en bloque y las gráficas de flujo, son representaciones gráficas que pretenden el acortamiento del proceso correctivo del sistema, sin importar si está caracterizado de manera esquemática o mediante ecuaciones matemáticas. Las ecuaciones diferenciales y otras relaciones matemáticas, se emplean cuando se requieren relaciones detalladas del sistema. Cada sistema de control se puede representar teóricamente por sus ecuaciones matemáticas.

6.1.3 Acciones básicas de control

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

- ✓ De dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)
- ✓ Proporcionales (P)
- ✓ Integrales (I)
- ✓ Proporcionales - integrales (PI)
- ✓ Proporcionales - derivativos (PD)
- ✓ Proporcionales – integrales – derivativos (PID)

Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)

En un sistema de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos son simplemente encendido y apagado. Este control es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Acción de control proporcional (P)

En este tipo de control la señal de entrada es proporcional a la señal de error del sistema, de esta manera la amplitud de la señal de entrada al sistema afecta directamente la salida, ya no es solamente un nivel prefijado si no toda una gama de niveles de entrada. Si la señal de error es grande, el valor de la variable regulada es grande y si la señal de error del sistema es pequeña, el valor de la variable regulada es pequeño.

Es el más simple de todos los tipos de control y teóricamente si la señal de error es cero, la salida del controlador también será cero. La respuesta, en teoría es instantánea, con lo cual el tiempo no interviene en el control. Sin embargo, en la práctica, esto no es así, de forma que, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y seguirá una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada.

Acción de control integral (I)

En un control integral, la señal de salida varía en función de la desviación y del tiempo en que se mantiene la misma, es decir, el valor de la acción del control es proporcional a la integral de la señal de error.

El problema principal del controlador integral radica en que la respuesta inicial es muy lenta, y hasta pasado un tiempo, el controlador no empieza a ser efectivo. Sin embargo elimina el error remanente que tenía el controlador proporcional.

Acción de control proporcional – integral (PI)

En la práctica no existen controladores que tengan solo una acción integral sino que llevan combinada una acción proporcional. Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).

Acción de control proporcional – derivativa (PD)

La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre cuando la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. Al incorporar a un controlador proporcional las características de un control derivativo, se mejora sustancialmente la velocidad de respuesta del sistema, a costa de una menor precisión en la salida (durante el intervalo de tiempo en que el control derivativo esté funcionando).

Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

Acción de control proporcional – integral – derivativa

Este tipo de control aprovecha la combinación de las características de cada una de las acciones de control individuales, de forma, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en el caso de cambios o perturbaciones. Tiene como desventaja que la parte de regulación del sistema, sea más propenso a oscilar y los ajustes sean más difíciles de realizar.

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, tal como el aire o el aceite. El tipo de control que se use debe decidirse con base

en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

Un control de temperatura es un sistema que obtiene la temperatura a medir mediante un sensor, esta señal es tratada, ya sea digital o análogamente (según el tipo de control a emplear), para después pasar por el sistema de control el cual activa o desactiva, aumenta o disminuye el sistema que estará encargado de mantener la temperatura.

Como se explicó en el capítulo 1, el dispositivo de control a diseñar debe mantener una temperatura lo más estable posible de acuerdo a las necesidades del usuario, con lo anterior se obtienen los parámetros bajo los cuales debe funcionar el dispositivo y para desarrollar el diseño y la construcción del dispositivo se utilizaron diversos elementos descritos en capítulos anteriores como son, transistores, capacitores, resistores, microcontroladores, circuitos integrados entre otros.

De acuerdo con lo anterior, el proyecto se basa en un sistema de control de lazo cerrado que utiliza un controlador de tipo on/off, que junto con el comparador se encuentran implementados vía software en un microcontrolador PIC y forman el núcleo de la etapa de control. El diseño se realizó mediante un enfoque convencional donde se busca satisfacer todas las especificaciones de desempeño mediante la repetición estudiada de prueba y error. Por lo que si después de diseñar el sistema, se verifica que no se cumple con las especificaciones de desempeño, se repite el proceso de diseño ajustando los parámetros o modificando la configuración del sistema hasta que se cumplan con las especificaciones determinadas. Así pues se tiene el siguiente diagrama de bloques del sistema de control de temperatura:

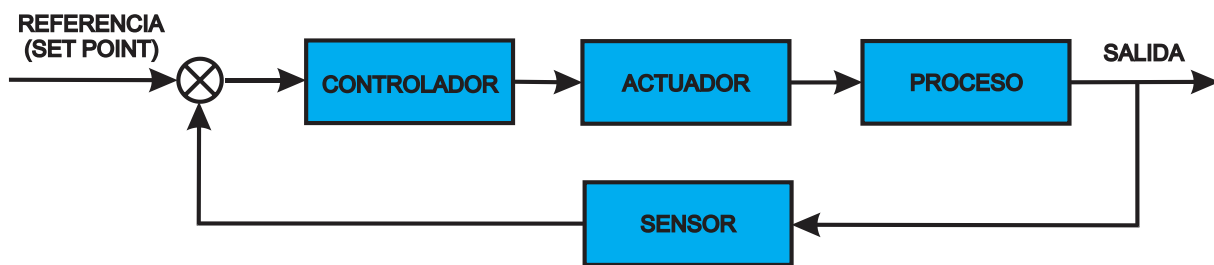


Figura 6-3. Diagrama de bloques del control de temperatura.

A continuación se desarrollan los diferentes bloques que conforman al dispositivo de control y que se dividen de manera general en: fuente de alimentación, circuito de sensado de temperatura, circuito de control y etapa de potencia.

6.2 Fuente de alimentación

Cuando trabajamos con circuitos electrónicos, se requiere una necesidad básica que es proveer de una fuente eléctrica. El propósito general de una fuente de alimentación, es hacer entrega de una o más tensiones eléctricas que pueden ser variables al circuito, con la suficiente capacidad para mantener las condiciones de operación deseadas.

Para este proyecto se requiere de dos tensiones, una de 5[Vdc] para el circuito electrónico y una fuente de 12[Vdc] para el elemento Peltier el cual a su vez necesita una corriente de 4[A] para su buen funcionamiento. Al realizar algunas consultas y para facilitar la construcción del dispositivo se optó por utilizar una fuente conmutada de una computadora de escritorio la cual puede entregar los 12[V] y una corriente máxima de 10[A] con lo cual se puede alimentar al elemento Peltier y de esta manera funcionar correctamente.

La fuente utilizada es del tipo ATX ("Advanced Technology Xtended") o tecnología avanzada extendida, que es la segunda generación de fuentes de alimentación introducidas al mercado para computadoras.



Figura 6-4. Fuente de alimentación tipo ATX.

La fuente ATX es un dispositivo que se monta internamente en el gabinete de la computadora y se encarga básicamente de transformar la corriente alterna de la línea eléctrica comercial en corriente directa; la cual es utilizada por elementos eléctricos y electrónicos de la computadora. Otra de sus funciones es la de suministrar la corriente y el voltaje que los dispositivos requieren así como de protegerlos de problemas de suministro eléctrico como son los sobre voltajes.

Internamente cuenta con una serie de circuitos encargados de transformar la energía eléctrica para que esta sea suministrada de manera correcta a los diferentes dispositivos. Externamente consta de los siguientes elementos:

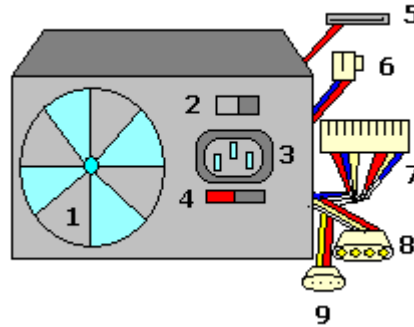


Figura 6-5. Partes que conforman a una fuente ATX.

1.- Ventilador: expulsa el aire caliente del interior de la fuente y del gabinete, para mantener frescos a los circuitos.

2.- Interruptor de seguridad: permite encender la fuente de manera mecánica.

3.- Conector de alimentación: recibe el cable de corriente desde el enchufe doméstico.

4.- Selector de voltaje: permite seleccionar el voltaje americano de 127[V] o el europeo de 240[V].

5.- Conector SATA: utilizado para alimentar los discos duros y las unidades ópticas tipos SATA.

6.- Conector de 4 terminales: utilizado para alimentar de manera directa al microprocesador.

7.- Conector ATX: alimenta de energía eléctrica a la tarjeta principal.

8.- Conector de 4 terminales IDE: utilizado para alimentar los discos duros y las unidades ópticas.

9.- Conector de 4 terminales FD: alimenta las disqueteras.

Para el circuito electrónico se requiere de una fuente de alimentación de 5[V] de corriente directa; considerando que los elementos de mayor consumo son los displays empleados para la visualización de los valores de temperatura con una corriente nominal de 60[mA] cada uno y considerando que el caso de mayor consumo es con dos displays y que el consumo de los demás componentes no supera los 10[mA], se considera que el circuito demandará una corriente máxima de 160[mA] regulados a 5[Vcd]. De acuerdo con lo anterior el diagrama de bloques de la fuente de alimentación, se muestra en la siguiente figura:

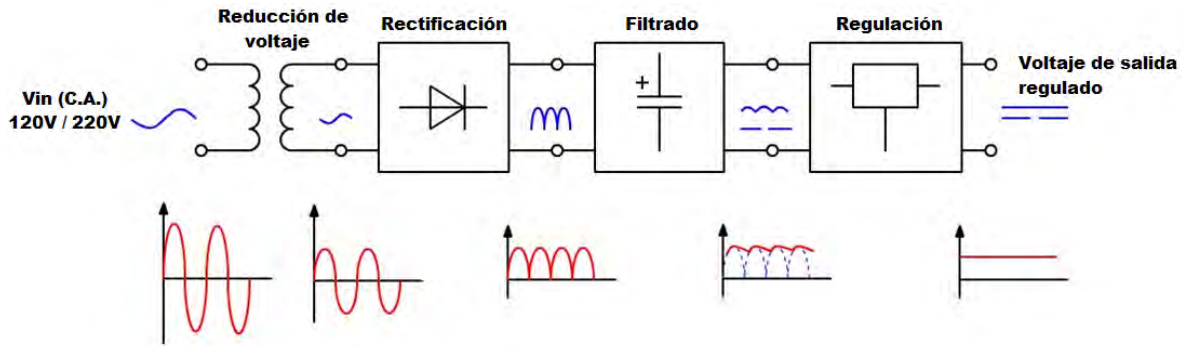


Figura 6-6. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación.

6.2.1 Reducción de tensión

La reducción de tensión se lleva a cabo mediante un transformador, lo cual resulta adecuado considerando la corriente que demanda el circuito, además de que en la fuente de alimentación el transformador sirve también para aislar el circuito de la red eléctrica.

El transformador a utilizar entrega una tensión de salida de 12[V_{RMS}] con una corriente máxima de 300[mA] en el secundario. Para limitar la corriente que circula por el secundario en caso de circuito corto se emplea un fusible como protección del sistema.

La corriente nominal bajo la cual opera el circuito es de 160[mA] para 5[Vdc], por lo que la potencia a la salida se obtiene mediante las siguientes operaciones:

$$P_{salida} = (V_{salida})(I_{salida})$$

$$P_{salida} = (5[V])(160[mA])$$

$$P_{salida} = 0.8[W]$$

Generalmente las pérdidas desde el transformador hasta la salida sin regular se encuentran entre el 5 y 20%, por lo que la potencia de entrada será:

$$P_{entrada} = P_{salida} (1.2)$$

$$P_{entrada} = (0.8[W])(1.2)$$

$$P_{entrada} = 0.96[W]$$

Considerando como estándar 127[Vca] de la línea, y un factor de potencia de 1, la corriente en el primario del transformador será:

$$I_{entrada} = \frac{P}{V}$$

$$I_{entrada} = \frac{0.96[W]}{127[V]}$$

$$I_{entrada} = 7.55[mA]$$

EL fusible comercial más cercano y adecuado será uno de fundido lento de 100[mA]

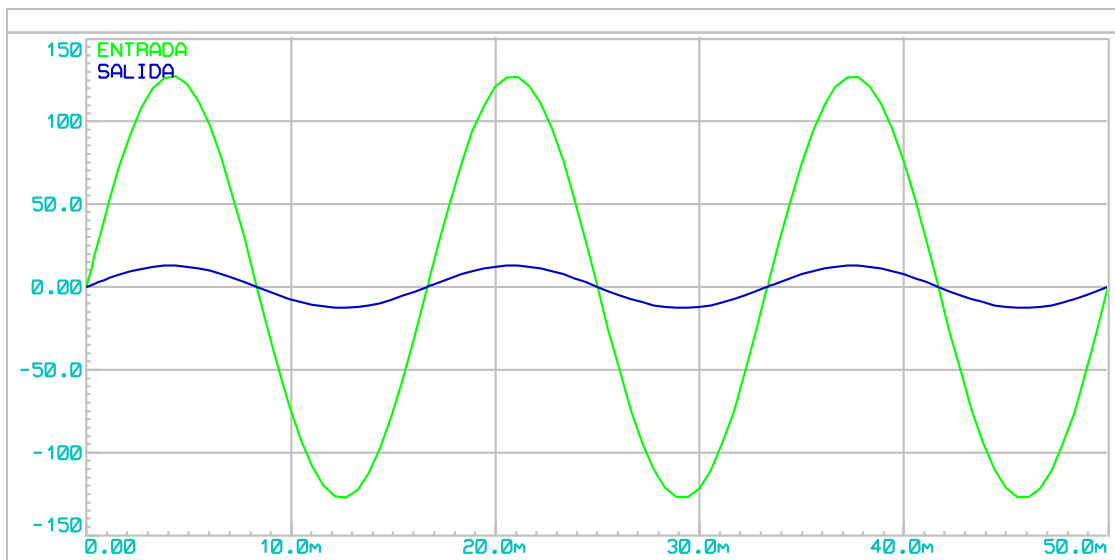
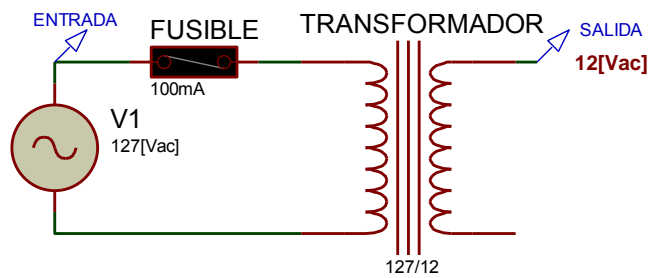


Figura 6-7. Circuito y gráfica de las señales de entrada y salida en la reducción de tensión.

6.2.2 Rectificación y filtrado

Para la rectificación de la señal se emplean 4 diodos rectificadores y para el filtrado un capacitor electrolítico. El transformador reduce la tensión del primario a un valor más pequeño en el secundario, tanto en el primario como en el secundario la tensión es del tipo alterna senoidal. La tensión pico o máxima presente en el secundario y que es la tensión en inversa que deben soportar los diodos, es $V_{m\acute{a}x}$.

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2}(V_{rms})$$

$$V_{m\acute{a}x} = (\sqrt{2})(12[V])$$

$$V_{m\acute{a}x} = 16.97[V]$$

La corriente que circula por cada par de diodos es la que demanda el circuito. Por razones de seguridad se toma un 50% por arriba de la corriente nominal del circuito.

$$I_{diodo} = (0.5)I_{salida} + I_{salida}$$

$$I_{diodo} = (0.5)(160[mA]) + I_{salida}$$

$$I_{diodo} = 80[mA] + 160[mA]$$

$$I_{diodo} = 240[mA]$$

Por lo anterior, los diodos adecuados deben soportar corrientes mayores a 240[mA] y una tensión en inversa mayor 16.97[V]. Los diodos elegidos para el circuito rectificador son los de la serie 1N4001 que de acuerdo con su hoja de datos pueden manejar corrientes hasta de 1[A] y tensiones en inversa de hasta 50[V].

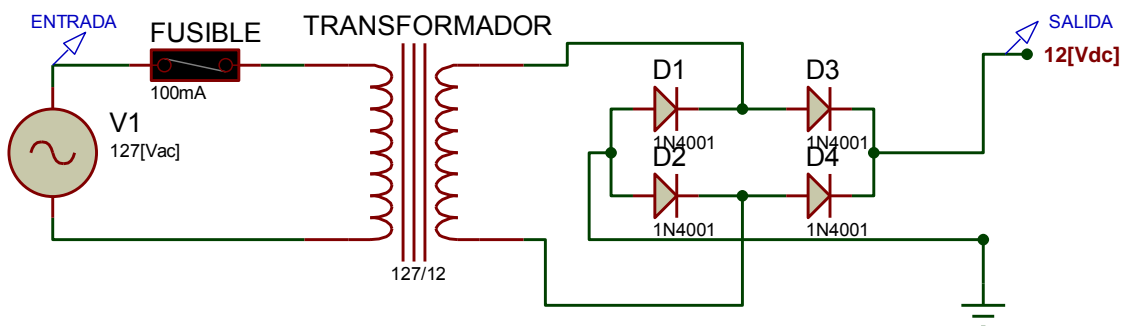


Figura 6-8. Circuito rectificador.

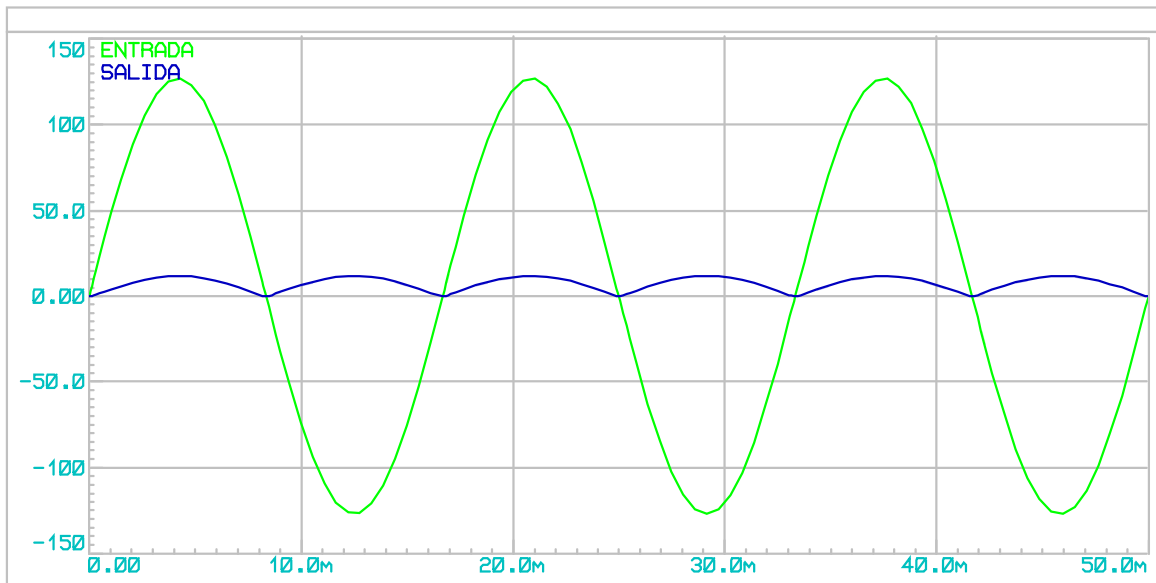


Figura 6-9. Gráfica de la señal de salida rectificada.

Para la selección del filtro se considera que en la etapa de regulación se emplea un regulador integrado lineal LM7805 el cual, de acuerdo con su hoja de datos, tiene un rechazo de rizo de 73dB, con lo cual prácticamente cualquier rizado es reducido al orden de los milivoltios. La limitante respecto al rizo es la tensión mínima que puede recibir el regulador a la entrada, la cual de acuerdo con sus características, debe de estar al menos 3[V] por encima de la tensión de salida. Para nuestro caso en donde queremos una tensión a la salida de 5[Vdc], la tensión mínima de entrada debe ser de 8[Vdc], por lo que el voltaje máximo de rizo pico a pico será:

$$V_{RPPMÁX} = V_{máx} - V_{diodo} - V_{mín}$$

Debido a que se tiene un rectificador de onda completa, la caída de tensión en los diodos es debida a dos diodos por cada ciclo de la señal senoidal, por lo que:

$$V_{diodo} = (2)(0.7) = 1.4[V]$$

Donde 0.7[V] es la tensión de conducción del diodo rectificador.

Así pues se tiene lo siguiente:

$$V_{RPPM\acute{A}X} = 16.97[V] - 1.4[V] - 8[V]$$

$$V_{RPPM\acute{A}X} = 7.57[V]$$

Con el valor del voltaje de rizo, podemos calcular el capacitor necesario para filtrar la señal de entrada, con base en la siguiente expresión:

$$V_{RPPM\acute{A}X} = \frac{I}{(f)(C)}$$

En donde $f=120[\text{Hz}]$ debido a que se tiene un rectificador de onda completa, por lo tanto:

$$C = \frac{I}{(f)(V_{RPPM\acute{A}X})}$$

$$C = \frac{160[mA]}{(120[Hz])(7.57[V])}$$

$$C = 176.13[\mu F]$$

Así mismo, la tensión que debe soportar el capacitor es la de la salida del transformador menos la caída de tensión en los diodos, por lo que se tiene lo siguiente:

$$V_c = 16.97[V] - 1.4[V]$$

$$V_c = 15.57[V]$$

Con los valores obtenidos, se necesita emplear un capacitor electrolítico con un valor comercial de $220[\mu F]$ a una tensión de $25[V]$, se puede emplear uno de mayor capacidad, la elección depende del costo del elemento. Para nuestro caso se empleó un capacitor de $470[\mu F]$ a $25[V]$, con el cual se obtiene un voltaje de rizo pico a pico menor.

$$V_{RPPM\acute{A}X} = \frac{(160[mA])}{(120[Hz])(470[\mu F])}$$

$$V_{RPPM\acute{A}X} = 2.83[V]$$

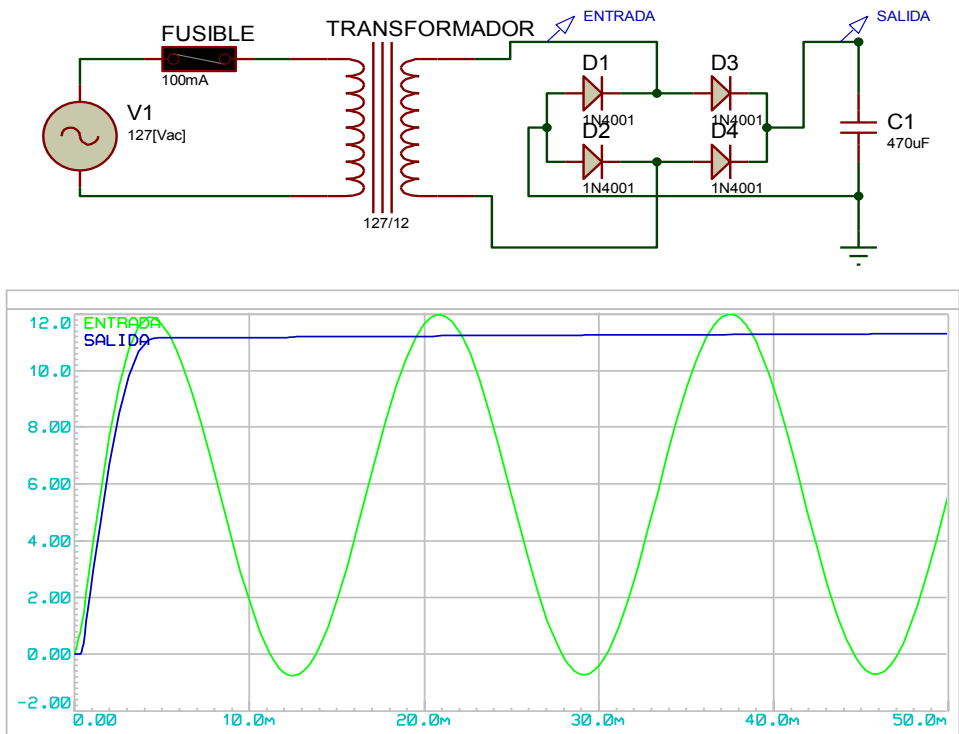


Figura 6-10. Circuito de filtrado y gráfica de la señal de salida filtrada.

6.2.3 Regulación

La regulación de la tensión se lleva a cabo mediante un regulador de la familia 7805. Debido a las oscilaciones producidas por el filtro capacitivo de la fuente de alimentación, se utiliza un capacitor de desacoplo a la entrada del integrado. Así mismo para mejorar la respuesta transitoria de la tensión de salida regulada, se usa un segundo capacitor de desacoplo. Los valores típicos de estos capacitores de acuerdo con las especificaciones del fabricante son de $0.33\mu\text{F}$ para el capacitor a la entrada y de $0.1\mu\text{F}$ para el de la salida.

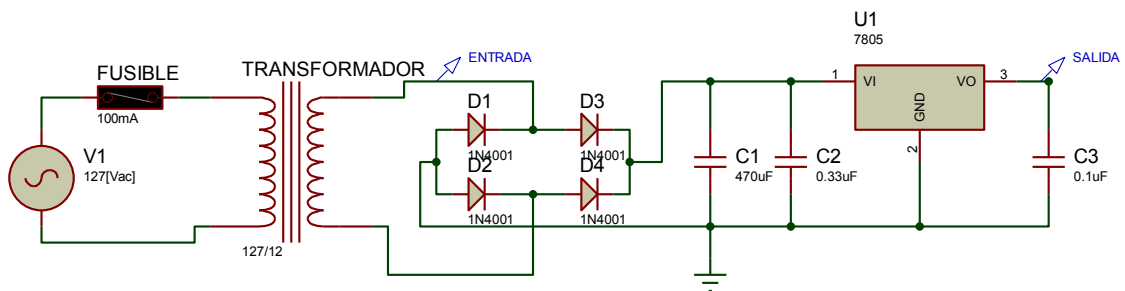


Figura 6-11. Circuito final de la fuente de alimentación con salida regulada.

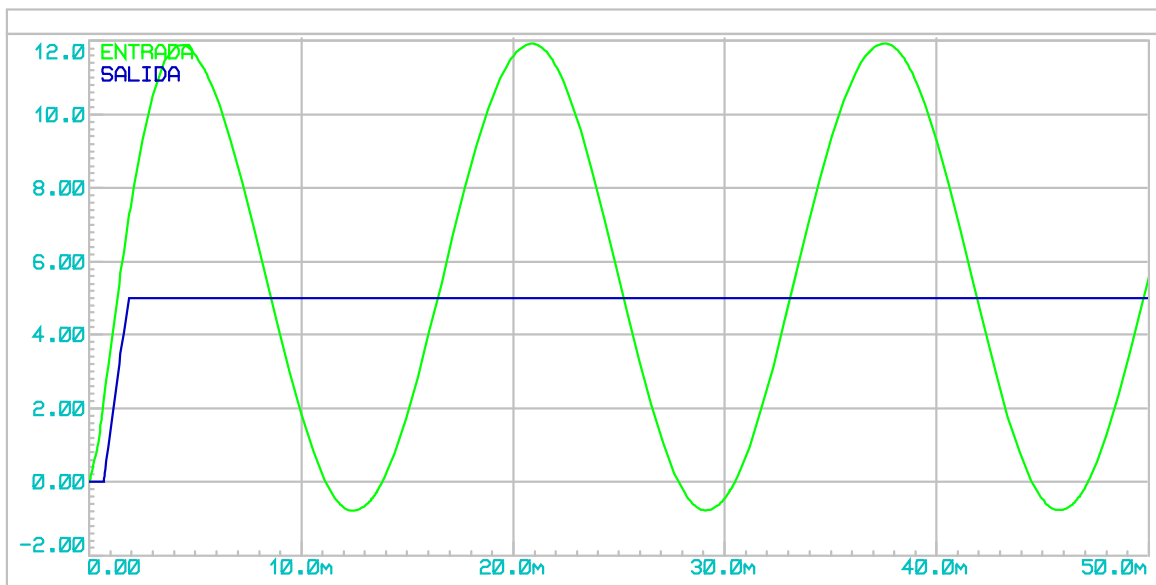


Figura 6-12. Gráfica de la señal de salida regulada.

6.3 Circuito de sensado de temperatura y nivel de referencia

El circuito para el sensado de la temperatura, tiene como función mandar a la salida una señal digital en respuesta al valor de la temperatura que se perciba. La variación de la temperatura se puede transformar en una variación de tensión, la cual es comparada con un nivel de tensión de referencia que proporciona el valor de la temperatura deseada al interior de la incubadora de acuerdo con la necesidad del usuario, ambas señales se conectan a amplificadores operacionales en su topología de seguidor de tensión para poder realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, posteriormente entran a la etapa de comparación la cual se realiza utilizando el microcontrolador PIC16F876A con el cual se tienen las salidas digitales que activan los diferentes dispositivos de potencia que se van a encargar de aumentar o disminuir la temperatura del interior de la incubadora.

6.3.1 Sensado de temperatura

Para transformar el valor de la temperatura sensada en señal eléctrica se hace uso de un sensor LM35 el cual puede medir temperaturas en el rango que abarca desde -55 a 150[°C] siendo la salida muy lineal en donde a cada grado celsius le equivale 10[mV] en la salida del sensor. Empleándolo sin configuración especial alguna, el dispositivo presenta un rango de medición de 2 a 150 [°C], lo cual es idóneo para el proyecto puesto que el rango de temperatura a la que se manejará el equipo es de 15 a 40[°C].

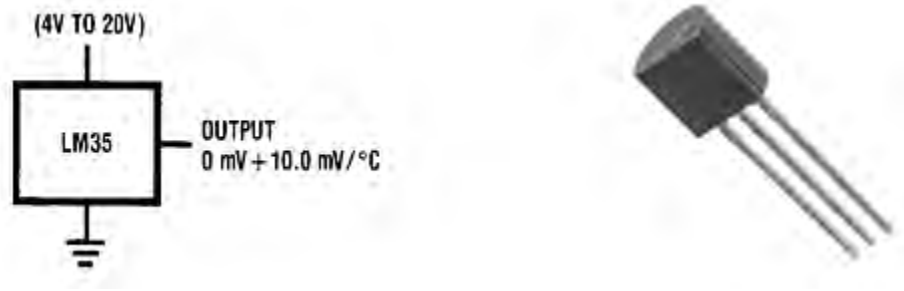


Figura 6-13. Configuración básica e imagen real del sensor LM35 en su encapsulado TO-92.

Para poder leer la tensión del sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte a la medición, se realiza la conexión del sensor a un seguidor de tensión cuya salida se amplifica diez veces para tener mayor resolución y mayor estabilidad en las mediciones, además se coloca un capacitor en paralelo a la salida del sensor para reducir lo mejor posible el ruido que puede intervenir en la medición de las lecturas. Así pues se utiliza un amplificador operacional LM324 debido a que funciona con una fuente de 5 [Vdc] y se coloca un potenciómetro entre el sensor y el seguidor para poder calibrar la temperatura y así tener datos lo más exactos posibles.

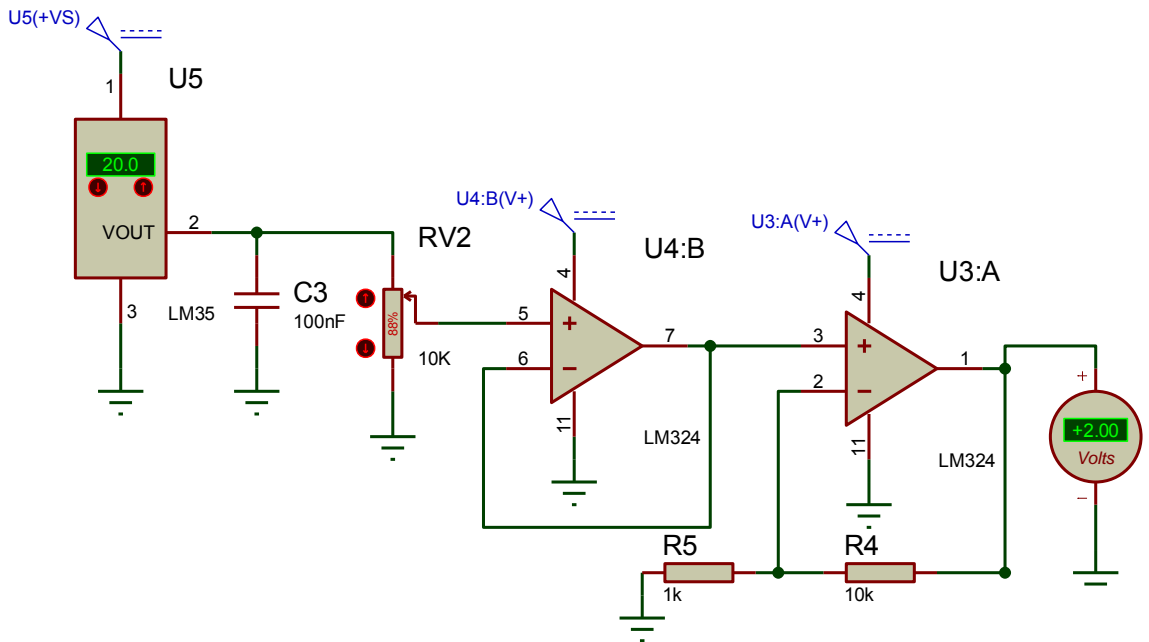


Figura 6-14. Circuito de sensado de temperatura.

6.3.2 Circuito de nivel de tensión de referencia

Así mismo para la tensión de referencia se requiere de una conexión a un amplificador operacional como seguidor y posteriormente a un amplificador de ganancia diez para obtener mejores resultados. Este voltaje de referencia será el que va a determinar la temperatura que se tenga que controlar dentro del equipo con el menor error posible. Para seleccionar este valor se utiliza un potenciómetro cuyo valor se calcula de la siguiente manera: Debido a que el rango de temperaturas a controlar oscila entre 15 a 40[°C], lo que equivale a 150[mV] y 400[mV] respectivamente, se toma como valor máximo a la salida 500[mV] y utilizando un potenciómetro de 5[kΩ], se tiene el siguiente divisor de tensión variable:

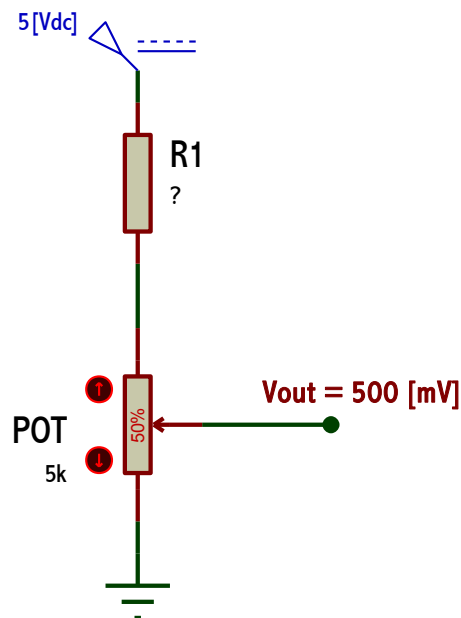


Figura 6-15. Esquema del divisor de tensión variable.

Para calcular el valor de R1, se tiene lo siguiente:

$$V_{out} = V_{dc} \left(\frac{POT}{POT + R1} \right)$$
$$500[mV] = (5[V]) \left(\frac{5[k\Omega]}{5[k\Omega] + R1} \right)$$
$$\frac{500[mV]}{5[V]} = \frac{5[k\Omega]}{5[k\Omega] + R1}$$
$$0.1 = \frac{5[k\Omega]}{5[k\Omega] + R1}$$

$$R1 = \frac{5[k\Omega]}{0.1} - 5[k\Omega]$$

$$R1 = 45[k\Omega]$$

Por lo tanto R1 debe ser de 45 [kΩ], así pues el valor comercial de resistencias cercano es de 47[kΩ], con lo que el circuito de nivel de referencia queda de la siguiente manera:

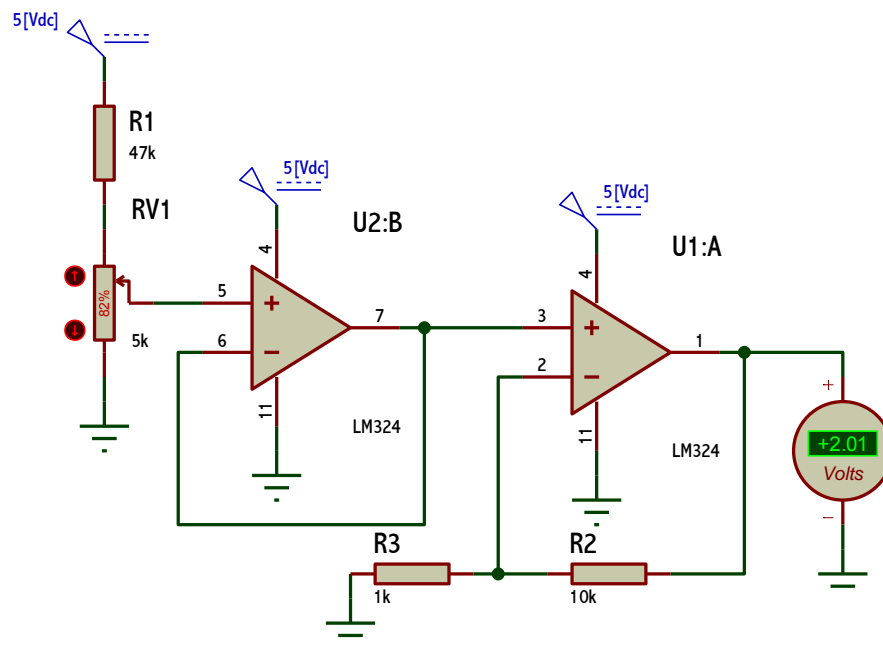


Figura 6-16. Circuito de nivel de tensión de referencia.

6.4 Etapa de comparación

Para la etapa de comparación se utiliza el microcontrolador PIC16F876A de la familia de Microchip cuyas características principales se muestran en el siguiente cuadro:

| PIC16F876A |
|--|
| Microprocesador RISC de 8 bits |
| Frecuencia de reloj: 4[MHz] |
| Temporizador de 8 bits y uno de 16 bits |
| 2 unidades de captura, comparación y PWM |
| Buses síncronos I2C y SSP |
| Unidad de comunicaciones serie asíncrona |
| 8 canales A/D de 10 bits |
| Memoria flash de 8kb y SRAM de 368 bytes |
| Memoria EEPROM de 256 bytes |

Tabla 6-1. Características principales del PIC16F876A.

Aprovechando las unidades de comparación y el convertidor analógico digital del microcontrolador, podemos ingresar las dos señales analógicas provenientes del sensor y del voltaje de referencia para después ser comparadas por el pic y de esta manera tener tres señales digitales a la salida del microcontrolador. Estas salidas están dadas de acuerdo con lo siguiente: la salida 1 será aquella que active al compresor del equipo para poder enfriarlo de manera rápida, la salida 2 activará al elemento Peltier que al igual que el compresor enfriará el interior de la incubadora cuando se requieran pequeños cambios de temperatura y la salida 3 se encargará de activar el elemento resistivo que va a ser el encargado de aumentar la temperatura cuando ésta se encuentre muy por debajo de la deseada en el interior de la incubadora. Así pues se establece un límite superior y un límite inferior que contrarrestan los efectos de sobrepaso en cualquier elemento de calentamiento y de enfriamiento, por lo que el límite superior está fijado 1 [°C] arriba del valor de la temperatura fijada por el nivel de tensión de referencia y el inferior en 1 [°C] por debajo del valor de referencia, esto debido a que es más rápido el efecto de calentamiento provocado por la resistencia que el de enfriamiento debido al compresor. De esta manera se tiene el siguiente diagrama deflujo.

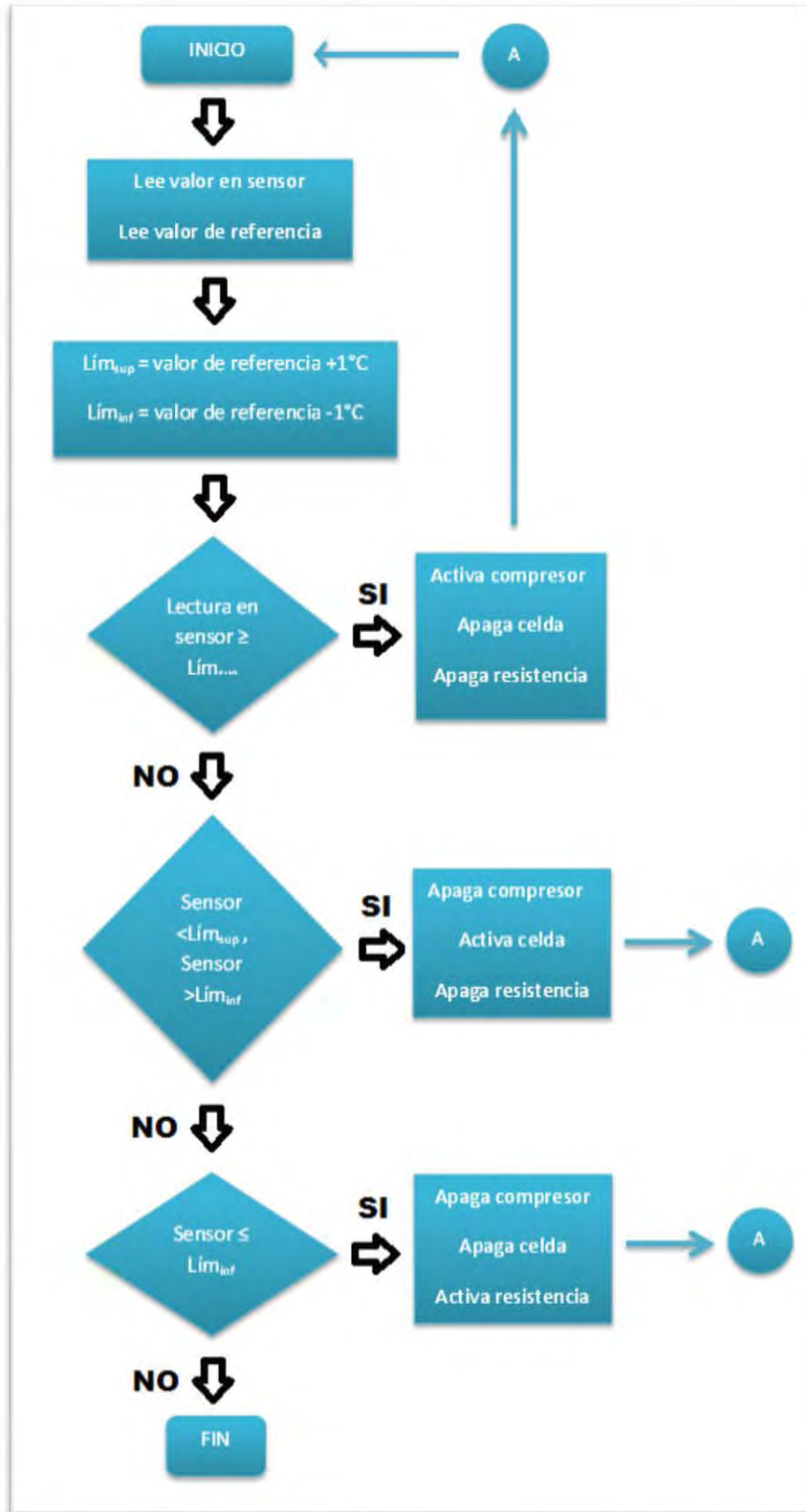


Figura 6-17. Diagrama de flujo de la etapa de comparación realizada por el microcontrolador PIC.

Una vez que se analiza en diagrama de flujo anterior, se realiza la programación del microcontrolador por medio del software PIC C Compiler, en lenguaje C y se carga el programa al PIC por medio de un programador de pics, con lo cual se tiene listo el micro para poder realizar el armado y poder pasar a la etapa de potencia.

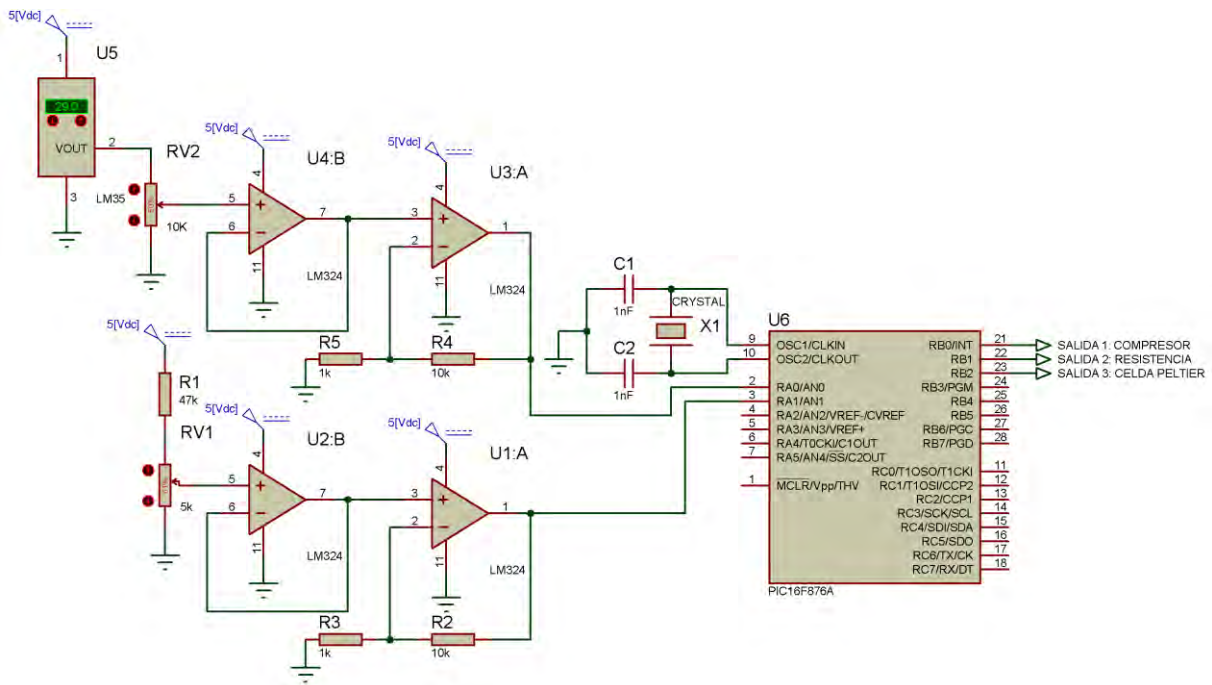


Figura 6-18. Circuito de sensado, nivel de referencia y microcontrolador PIC.

6.5 Etapa de potencia

Las salidas del microcontrolador sólo proporcionan tensiones continuas de 5[Vdc], por lo que para poder activar tanto a la resistencia de calentamiento como al compresor, se requiere de una alimentación de corriente alterna de 127[Vac], así pues para realizar el acoplamiento de estos elementos con el circuito de control, se utilizan TRIAC's que son dispositivos semiconductores bidireccionales capaces de conmutar la corriente alterna. Estos dispositivos se activan por medio de señales de corriente directa provenientes de las salidas del microcontrolador, las cuales están conectadas a optoacopladores que funcionan como protección entre la etapa de entrada y salida para así evitar daños en ambas etapas cuando alguna de ellas falle eventualmente. De acuerdo con lo anterior se utiliza el MOC3011 como optoacoplador tomando en cuenta su hoja de especificaciones, que sugiere que para una carga resistiva, para nuestro caso la resistencia de calentamiento, se tiene el siguiente circuito.

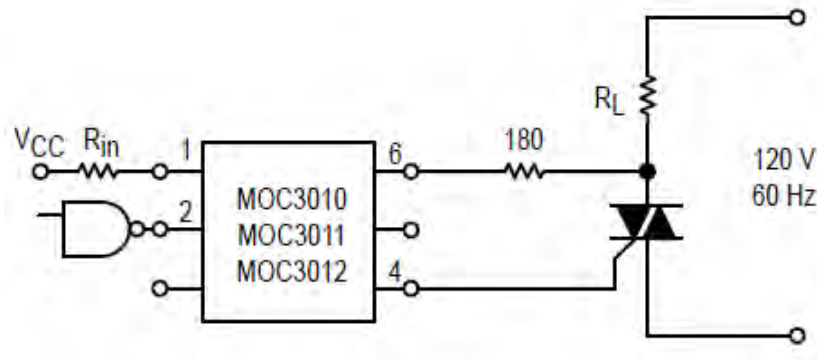


Figura 6-19. Circuito de conmutación para una carga resistiva.

Para la configuración del MOC, se debe considerar que se tiene un diodo emisor que soporta una corriente de 10[mA], y conociendo que la magnitud de la señal proveniente del microcontrolador es $V_{cc} = 5[V_{dc}]$ y que la caída de tensión en el diodo es de 1.2[V], se calcula la resistencia limitadora R_{in} necesaria para que no se dañe el dispositivo.

$$V_{cc} = IR_{in} + V_d$$

$$R_{in} = \frac{V_{cc} - V_d}{I}$$

$$R_{in} = \frac{5[V] - 1.2[V]}{10[mA]}$$

$$R_{in} = 380[\Omega]$$

Este es el valor mínimo que debe de tener el resistor, por lo que resulta adecuado utilizar uno de 470[Ω], para garantizar la activación del diodo emisor del optoacoplador.

Así mismo la elección del TRIAC estará en función de las necesidades, en este caso se eligió el TRIAC BT137 capaz de soportar corrientes de hasta 8[A] y manejar tensiones de 600[V].

De manera similar al circuito de la resistencia de calentamiento, para el circuito de activación del compresor, se toma el diagrama propuesto por el fabricante para una carga inductiva, para lo cual se tiene lo siguiente:

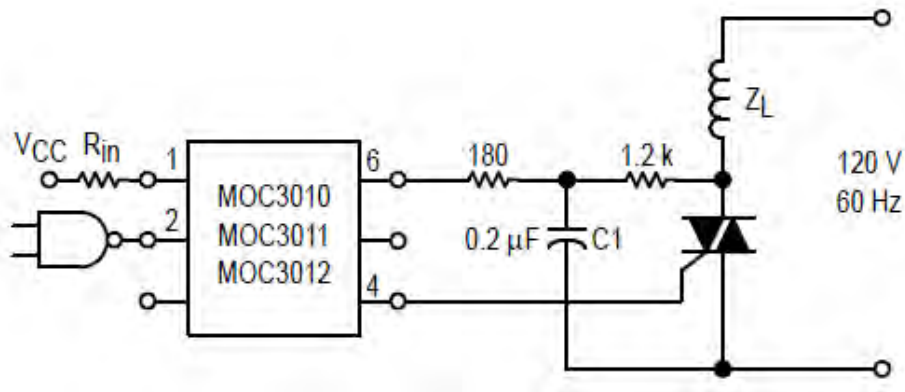


Figura 6-20. Circuito de conmutación para una carga inductiva (motor).

Debido a que se tiene el mismo dispositivo para opto acoplar la salida del circuito, como en el caso de la resistencia de calentamiento, el valor de la resistencia limitadora de corriente a la entrada del MOC es de $470[\Omega]$.

A diferencia de la resistencia de calentamiento y del compresor, la celda necesita un dispositivo que pueda conmutar en corriente directa, para lo cual se requiere de un transistor de potencia capaz de entregar la corriente suficiente que necesita la celda para su funcionamiento. Además se va a utilizar un optotransistor CNY17 ya que puede entregar a la salida una corriente máxima de $90[\text{mA}]$ y soportar a la entrada corrientes de hasta $60[\text{mA}]$, por lo cual el circuito de conmutación de la celda Peltier es el siguiente:

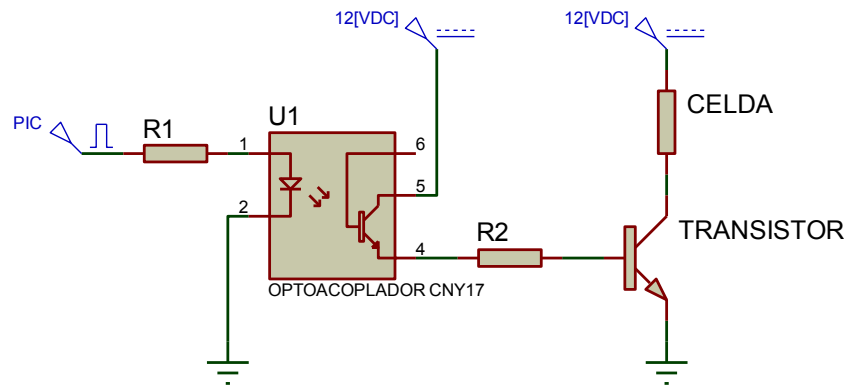


Figura 6-21. Circuito para la conmutación de la celda Peltier.

De la misma manera que se calculó la resistencia a la entrada del MOC3011, para la resistencia a la entrada del optoacoplador CNY17, se utiliza la misma metodología, conociendo que la tensión en el diodo emisor es de $1.15 [\text{Vdc}]$ y la máxima corriente que soporta el diodo es de $10[\text{mA}]$, y que la señal proveniente del pic es de $5[\text{Vdc}]$, se tiene que:

$$R1 = \frac{5[V] - 1.15[V]}{10[mA]}$$

$$R1 = 385[\Omega]$$

Este es el valor mínimo que debe tener el resistor, por lo que resulta adecuado utilizar uno de 470[Ω], con lo que se garantiza que se active el diodo emisor del optoacoplador.

La resistencia R2 es la encargada de ajustar la corriente que debe suministrar el optotransistor a la base del transistor de potencia, para que cuando circule entre ésta y el emisor se produzca el gran paso de corriente entre el colector y el emisor, con lo que nuestra carga (celda Peltier), tenga la suficiente intensidad de corriente para funcionar.

De acuerdo con la hoja de especificaciones del optotransistor CNY17, nos puede entregar una corriente máxima de 90[mA] y queremos conectar una carga que necesita 12[Vdc] y que consume 4[A], por lo que se requiere de un transistor que pueda proporcionar como mínimo unos 5[A] y soportar un voltaje de por lo menos 25[V].

De acuerdo con las hojas de características, se comprueba que el transistor TIP35 se puede utilizar ya que tiene una corriente de colector (I_C) de 25[A] y un V_{CE0} de 100[V] por lo que es más que suficiente para nuestros requerimientos. De acuerdo con su hoja de especificaciones se tiene que su h_{FE} (β) es de 25 por lo que se calcula la resistencia necesaria en la base del transistor.

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_B = \frac{4[A]}{25}$$

$$I_B = 0.16[A]$$

Tomando en cuenta la caída de tensión en la base – emisor del transistor (V_{BE}), que es igual a 2[V], se tiene lo siguiente:

$$R2 = \frac{5[V] - 2[V]}{0.16[A]}$$

$$R2 = 18.75[\Omega]$$

Debido a que la resistencia obtenida es baja se puede prescindir de ella. Así pues el circuito de conmutación para la celda Peltier es el siguiente:

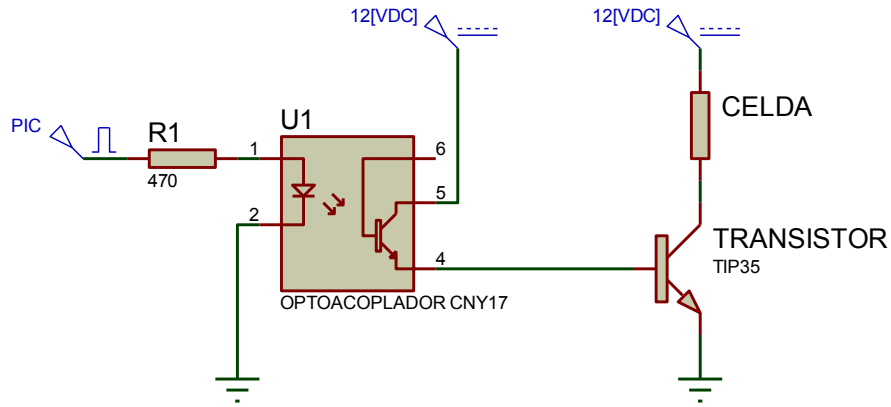


Figura 6-22. Circuito final para la conmutación de la celda Peltier.

Finalmente el circuito del control de temperatura se muestra en la siguiente figura:

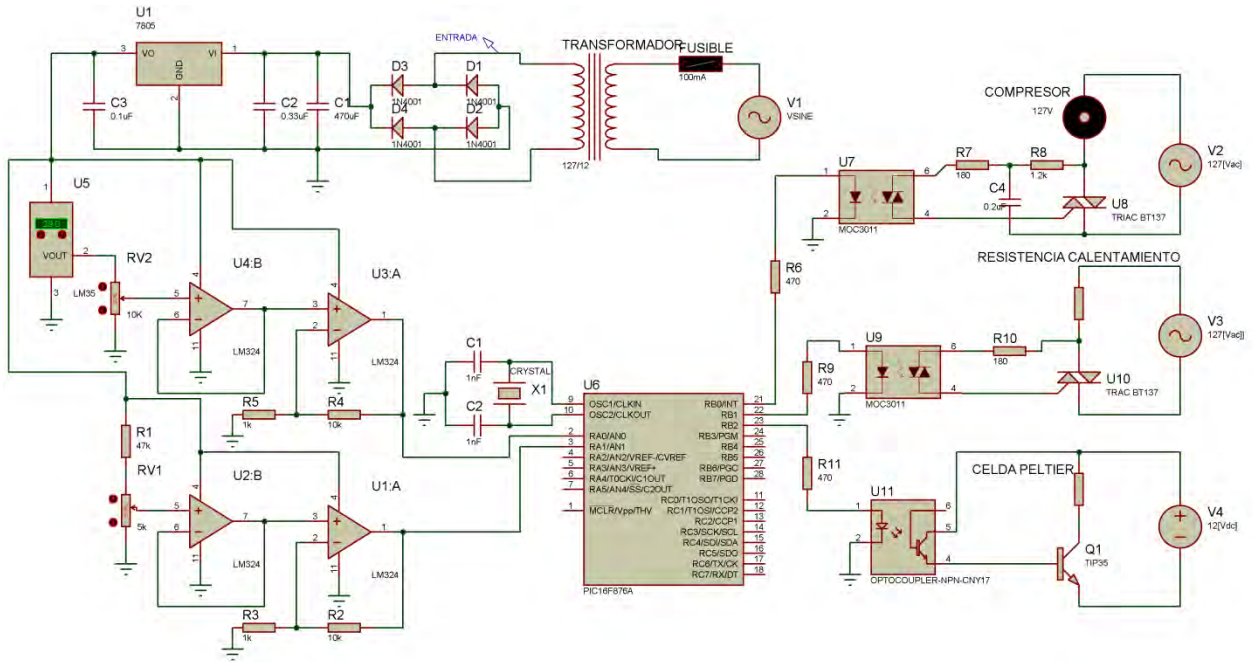


Figura 6-23. Circuito completo del control de temperatura.

PRUEBAS

Se realizaron pruebas para distintas temperaturas durante un tiempo de dos horas, obteniendo las siguientes gráficas.

Para una temperatura de 16[°C].

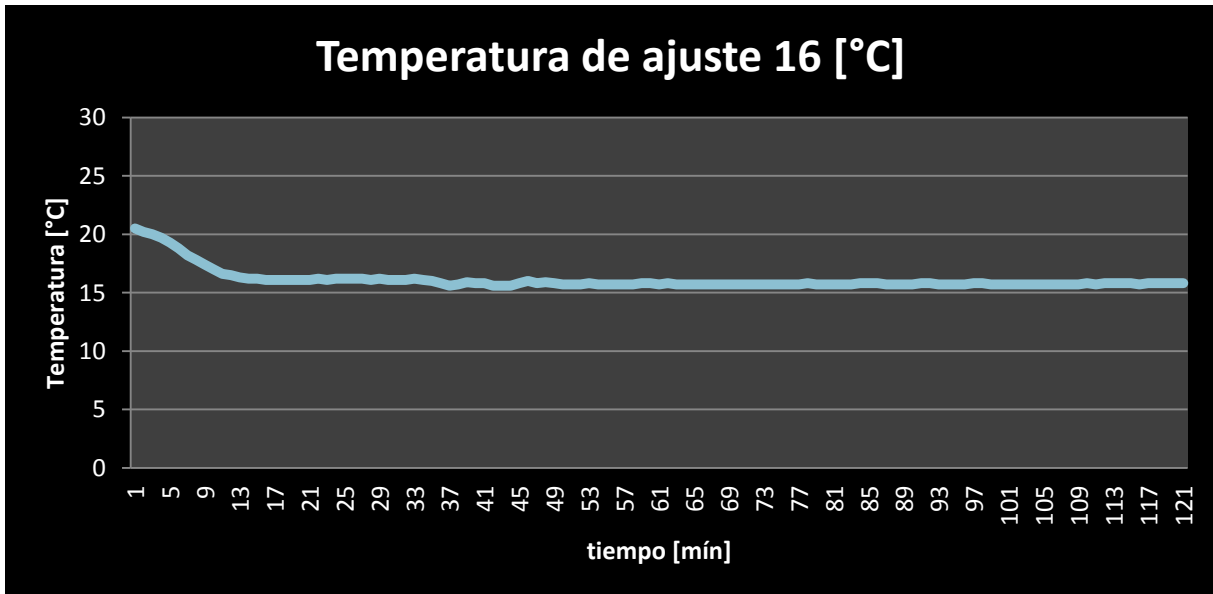


Figura P-A. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 16[°C].

Para una temperatura de 20[°C].

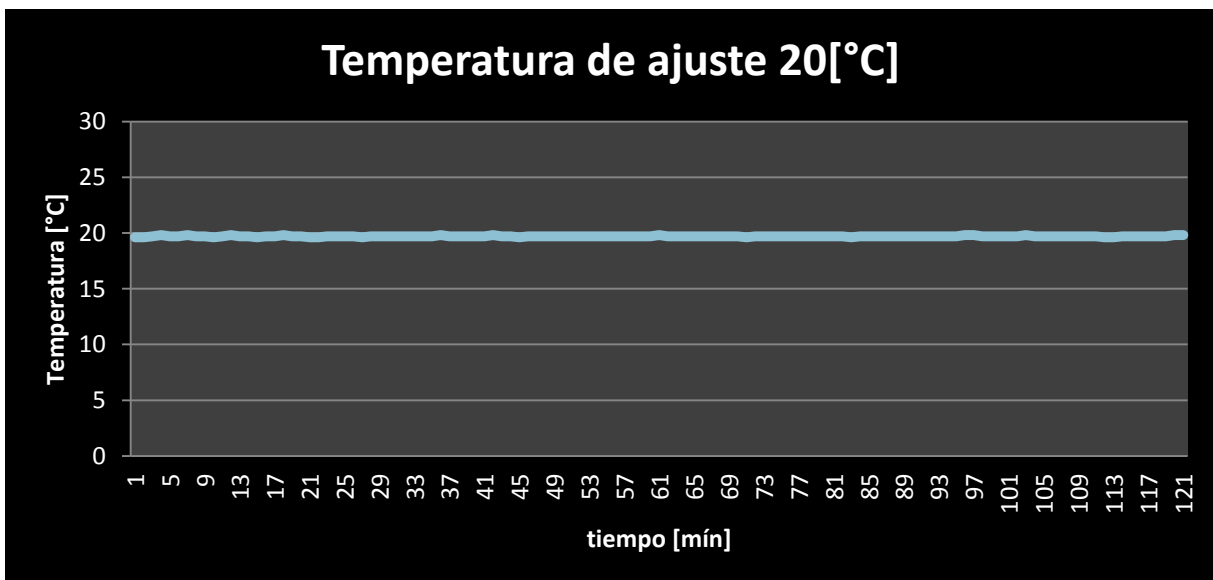


Figura P-B. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 20[°C].

Para una temperatura de 25[°C].

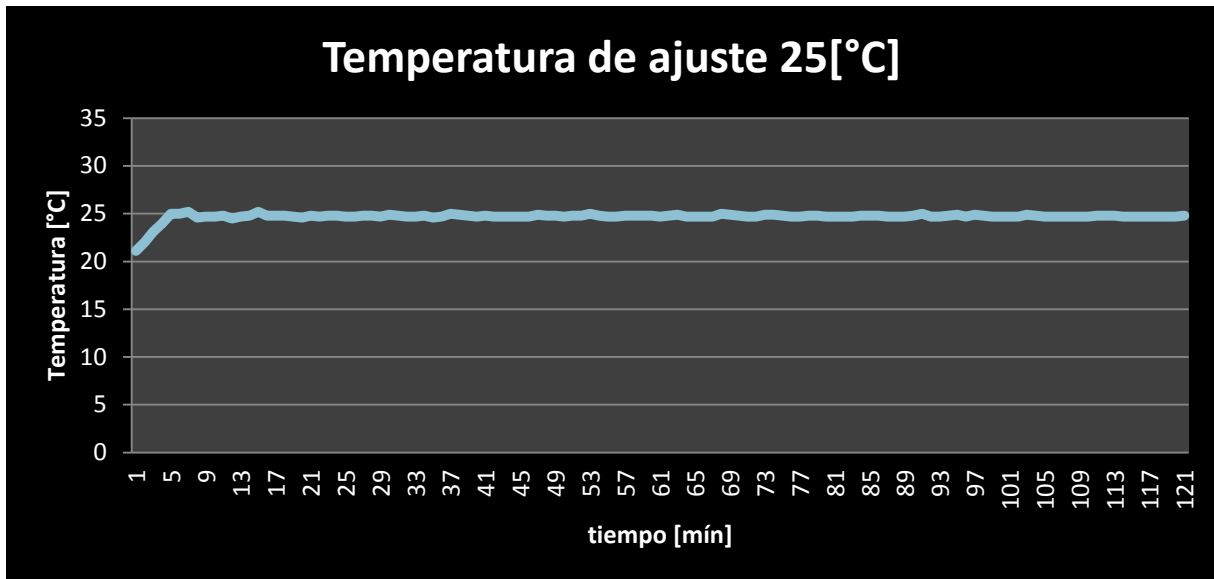


Figura P-C. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 25[°C].

Para una temperatura de 30[°C].

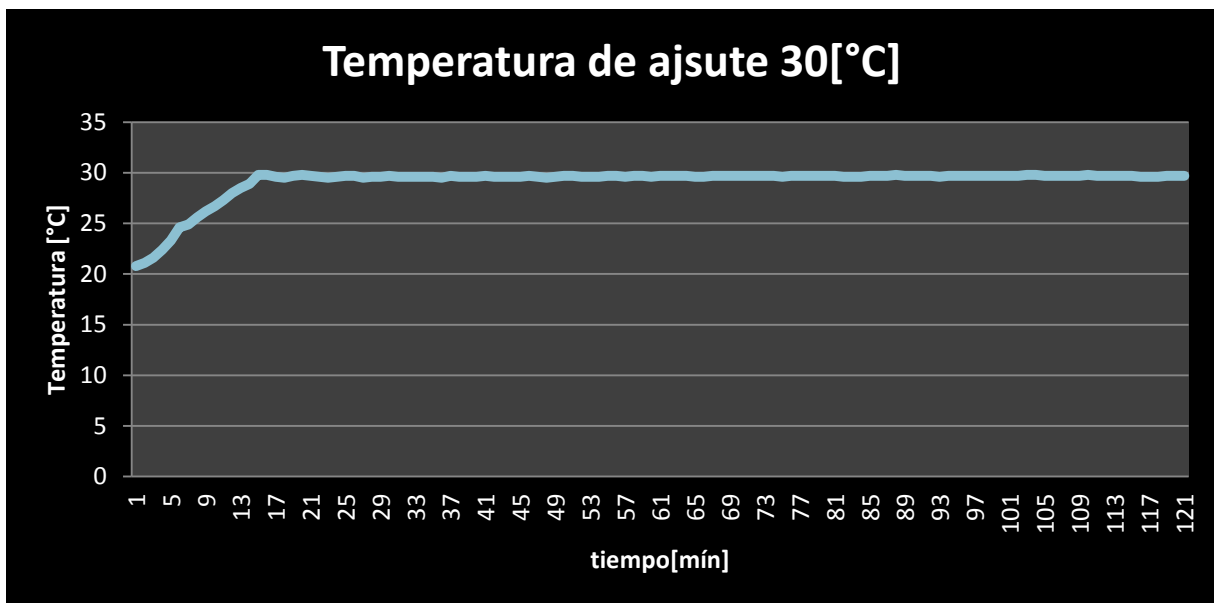


Figura P-D. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 30[°C].

Para una temperatura de ajuste de 33[°C].

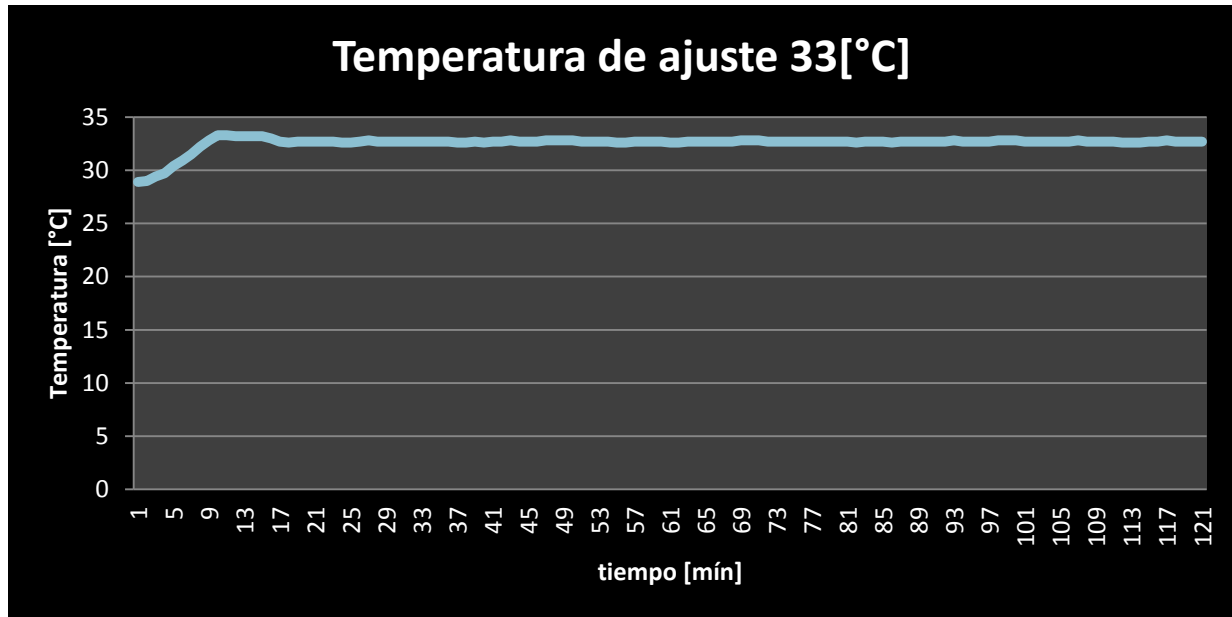


Figura P-E. Gráfica del comportamiento en el interior del equipo con una temperatura de ajuste de 33[°C].

CONCLUSIONES

Se diseñó un control de temperatura para una incubadora capaz de controlar la temperatura del interior del equipo. Este sistema contribuye con los ensayos que se realizan para estudiar los comportamientos de ciertos microorganismos presentes en la materia orgánica. El sistema permitió contar con un panel en la parte frontal en el cual el usuario ajusta, por medio de una perilla, la temperatura que desea se tenga al interior del equipo. Se cuenta además con dos displays de fácil visualización que registran tanto la temperatura de ajuste como la que se detecta por medio del sensor, por lo anterior y con las pruebas realizadas con el equipo para diferentes temperaturas de ajuste, se pudo comprobar la eficiencia del sistema.

Tomando en cuenta las gráficas obtenidas durante las pruebas realizadas al equipo se puede observar que la oscilación de la temperatura con respecto a la que se desea controlar, oscila entre 0.2 y 0.3 de grado centígrado por lo que se cumple el objetivo de tener un error menor al 0.5 de [°C]. Así mismo se puede hacer al sistema más preciso modificando ciertas características, como por ejemplo, el recubrimiento original del equipo, la utilización de dos o más elementos Peltier, así como poder controlar humedad y luminosidad, sin embargo estas acciones generarían mayor inversión en el desarrollo del proyecto.

En comparación al costo de equipos incubadores que se encuentran actualmente en el mercado cuyo precio se encuentra entre los 20,000 pesos mexicanos en adelante, la inversión realizada en el material para este proyecto no sobrepasa los 6,000 pesos, teniendo de manera significativa un ahorro considerable.

Durante el diseño, la construcción y la implementación de este proyecto se logró poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera reafirmando conceptos y mejorando la comprensión en aquellos que estaban un poco difusos y poder así aplicarlos en problemas que se presenten en el ámbito laboral. Así mismo se lograron aprender diversos temas de manera autodidacta lo que hace que se tenga un mayor interés y mayor confianza en el desarrollo de proyectos que se nos asignen teniendo como base la experiencia adquirida durante el desarrollo de este sistema.

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo diseñar un sistema sencillo, barato, y sobre todo eficiente con lo que se puede concluir como un proyecto satisfactorio que cumple con las expectativas del usuario haciéndolo amigable y de fácil manejo contribuyendo así al desarrollo de la investigación científica en nuestro país en beneficio de la sociedad.

ANEXO: APARIENCIA INTERNA Y EXTERNA DEL CONTROL DE TEMPERATURA

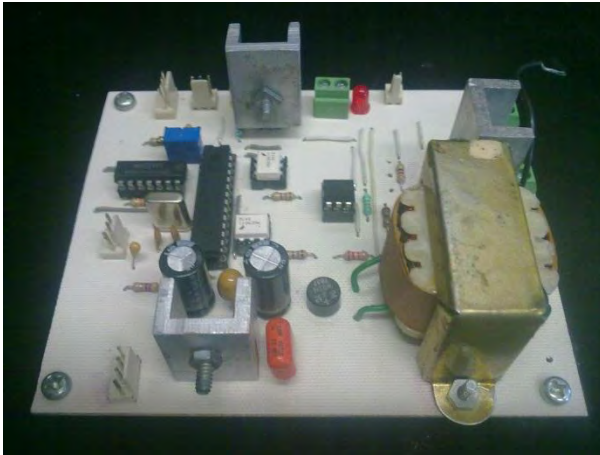


Figura A-1. Circuito de control.



Figura A-2. Vista lateral interna del sistema de control.



Figura A-3. Vista posterior del sistema de control.



Figura A-4. Vista frontal del sistema de control.



Figura A-5. Interior del equipo de refrigeración.



Figura A-6. Vista frontal del equipo de refrigeración.

BIBLIOGRAFÍA

Malvino, Albert Paul, Principios de Electrónica, 6ª Edición. McGraw-Hill, España, 2000.

Boylestad, Robert L, Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, 8ª Edición. Pearson Educación, México 2003.

Jaramillo, Gabriel A, Electricidad y Magnetismo, 1ª Reimpresión, Trillas, 2001.

Slurzberg y Osterheld, Fundamentos de Electricidad – Electrónica, 3ª Edición. McGraw-Hill, México 1991.

Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, 4ª Edición. Prentice Hall Hispanoamericana.

García Eduardo, Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC, 1ª Edición. Alfaomega, México 2008.

Carlos A. Reyes, Microcontroladores PIC, 2ª Edición. Rispergraf, Quito Ecuador 2006.

Apuntes Circuitos Integrados Analógicos.

MESOGRAFÍA

www.definicion.de/ingenieria-ambiental/

www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Thermistor

www.scribd.com/doc/24435377/Amplificadores-Operacionales-y-Circuitos-Integrados-Lineales

www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termistores.htm

www.scribd.com/doc/28448328/Los-medios-de-cultivo-en-microbiologia

www.contaminacion-ambiente.blogspot.com/

www.heatingdrinks.blogspot.com/2007/05/sensor-de-temperatura.html

www.ampere.com.mx/veris/relevador.php

www.electronicafacil.net/tutoriales/Principios-Basicos-Materiales-Semiconductores.php

www.guanakoo.org/143526/principios-de-electronica-pdf/9/

www.hispavila.com/3ds/lecciones/lecc3.htm

www.lcardaba.com/articles/heatsinks/heatsinks.htm

www.yoreparo.com/articulos/electronica/ruidos-en-los-sistemas-con-microcontroladores-3/

[www.informaticamoderna.com/Fuente AT.htm](http://www.informaticamoderna.com/Fuente_AT.htm)

www.electronicaymedidas.hostzi.com/CURSO/CONDENSADOR.htm