



---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TEMA DE TESIS

SISTEMA INTEGRAL DE CONTROL PARA REFRIGERACIÓN  
COMERCIAL

Que para obtener el título de:

Ingeniero Eléctrico-Electrónico

P R E S E N T A N:

CONSTANTINO AMAYA TUMALAN

DANIEL ALTAMIRANO LUGO

LEONEL REYES ROSALES

MAGNOLIA SUSANA JIMÉNEZ ESPINOSA

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. NORMA ELVA CHÁVEZ RODRIGUEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

MEXICO D. F. 2013

## INDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1.1.3. Lenguaje C.....	9
2.3.2.1. Teoría del funcionamiento de un transformador .....	25
CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	56
3.3. Medición de temperatura basada en microcontroladores.....	61
CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	71
4.1. Especificaciones del diseño.....	71
4.2.1. Circuito detector de media onda, detección de tensión a través del ciclo positivo de la señal de AC.....	73
4.2.1.1. Sensado de tensión.....	76
4.2.2. Programación para detectar la señal de tensión de alterna.....	77
4.2.3. Determinación de los valores de operación.....	79
4.2.3.1. Límites y sus recuperaciones .....	80
4.2.3.2. Primero, segundo y tercer cambio con ventana de tensión de histéresis ...	80
4.2.3.3. Activación y desactivación de los relevadores y selección de devanados del transformador .....	81
4.2.3.4. Diagrama de flujo del regulador .....	82
4.3. Termostato electrónico .....	84
4.3.1. Obtención del modelo matemático para la programación .....	85
4.3.2. Activación y desactivación del compresor.....	86
4.3.3. Visualización del estado de temperatura mediante LCD .....	87
4.3.4. Programación del deshielo .....	89
4.3.5. Tiempos mínimos de operación y descanso del compresor .....	89
4.3.6. Jerarquías de activación y desactivación del compresor .....	90
4.4. Unificación de los elementos en un solo dispositivo.....	91
4.5. Construcción del prototipo .....	93
CAPÍTULO V. PRUEBAS, AJUSTES Y RESULTADOS.....	99
CONCLUSIONES.....	114
APÉNDICES.....	115

ÍNDICE

APENDICE B..... 116  
APENDICE C ..... 117  
BIBLIOGRAFÍA..... 125

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un prototipo que permita ser introducido en la industria de la refrigeración comercial como una alternativa para la reducción de materiales en la fabricación de enfriadores. Este dispositivo será capaz de cumplir con los requerimientos de funcionalidad y protección, a fin de sustituir el uso de termostatos y reguladores de tensión de manera independiente, fusionando las características de estos elementos en uno solo mediante el uso un microcontrolador, optimizando la regulación de tensión y temperatura para sistemas de refrigeración comercial.

Tratándose de la industria de la fabricación de enfriadores comerciales, es conveniente contar con un control en la adquisición de materiales para su fabricación, ya que en algunos casos uno de los principales problemas que se tiene al momento de fabricar un producto que requiere de la adquisición de varios elementos de distintos proveedores, es contar con los materiales en tiempo y forma. Aun cuando exista planeación de por medio, muchos de los factores que retrasan la producción son los componentes que no se tienen completos en el almacén al momento de planificar la fabricación.

Hablando particularmente del ensamble de enfriadores, se debe contar con varios números de partes para su elaboración. Por lo tanto, contar con un control que elimine la adquisición de dos materiales por separado tiene sus ventajas.

Este proyecto de tesis pretende dar una alternativa para contar con un solo dispositivo que tenga las funciones de operación de un termostato electrónico y un regulador de tensión en un solo dispositivo.

El método utilizado es el siguiente:

- Mediante IAR, compilador de C y microcontroladores serie MSP430, se generará el código para el control.
- Mediante un microcontrolador de la serie MSP430 de Texas Instruments se integrarán las funciones de un termostato y un regulador de tensión.
- Se utilizará un autotransformador con devanados que serán utilizados para regular la tensión hacia el compresor del enfriador.
- Se utilizará un termistor como sensor de temperatura por su excelente respuesta a temperaturas cercanas a los cero grados Celcius.

El objetivo de este trabajo es:

- Construir un prototipo que permita reducir en un solo sistema, un termostato y un regulador de tensión para su uso en la industria de la refrigeración.
- Contar con un prototipo base para futuros desarrollos, el cual permita integrar mayores funciones que sean de utilidad para la industria de la refrigeración.

En el capítulo dos se da una breve descripción de los conceptos principales a los que se harán referencia a lo largo de esta tesis con el fin de ubicar al lector en un contexto adecuado.

En el capítulo tres se describe en forma separada cada uno de los componentes que integrarán el diseño final del prototipo.

En el capítulo cuatro se construye la primera versión del prototipo, realizando las mediciones, cálculos y los códigos necesarios para los fines deseados en el diseño.

En el capítulo cinco se realizan las pruebas de funcionamiento, con base en éstas se procede a realizar mejoras para optimizar el desempeño del prototipo construido.

Finalmente se presentan las conclusiones arrojadas durante la creación de este trabajo.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Características generales de los microcontroladores

El microcontrolador se puede definir como un dispositivo electrónico programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de procesos lógicos. Un sistema con microcontrolador debe disponer de memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo, y una vez programado y configurado únicamente se emplea para realizar el proceso asignado. La figura 2.1 muestra el esquema básico de un microcontrolador.

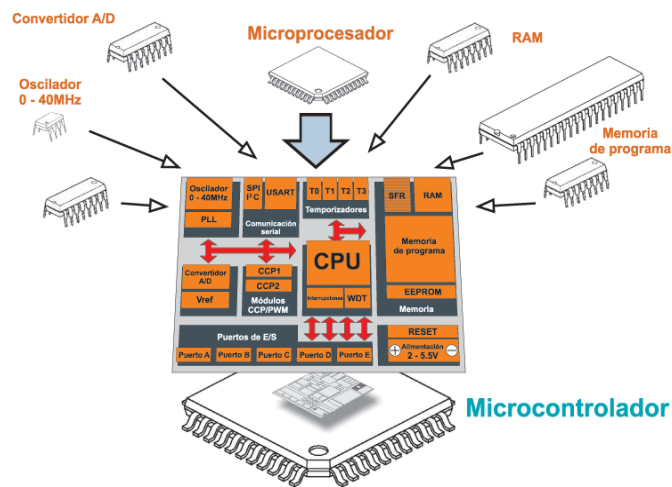


Figura 2.1. Esquema básico de un microcontrolador

Todo microcontrolador incluye las siguientes características básicas:

- Procesador
- Memoria
- Puertos de entrada/salida
- Reloj principal

- Temporizador o timer
- Perro guardián o watchdog
- Conversor A/D
- Conversor D/A
- Comparador analógico
- PWM

### **2.1.1. Lenguajes de programación**

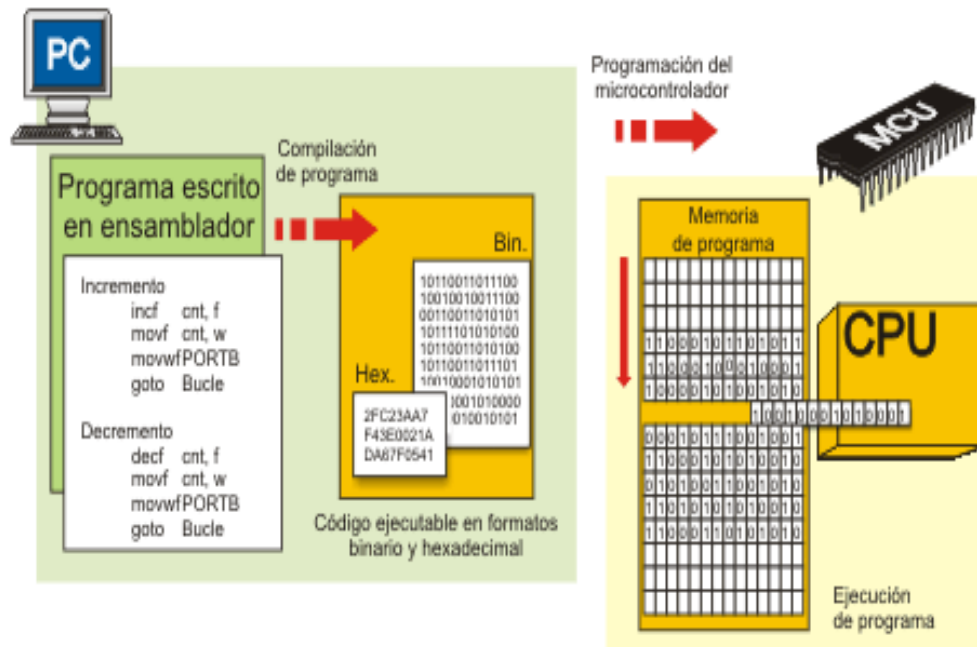
El microcontrolador ejecuta el programa cargado en la memoria Flash. Esto se denomina el código ejecutable y está compuesto por una serie de ceros y unos, aparentemente sin significado. Dependiendo de la arquitectura del microcontrolador, el código binario está compuesto por palabras de 12, 14 o 16 bits. Cada palabra se interpreta por la CPU como una instrucción a ser ejecutada durante el funcionamiento del microcontrolador. Todas las instrucciones que el microcontrolador puede reconocer y ejecutar se les denominan colectivamente conjunto de instrucciones. Puesto que es más fácil trabajar con el sistema de numeración hexadecimal, ya que ocupa menos bits, y así se optimiza memoria, el código ejecutable se representa con frecuencia como una serie de los números hexadecimales denominada código Hex.

#### **2.1.1.1. Lenguaje ensamblador**

Como el proceso de escribir un código ejecutable era considerablemente arduo, en consecuencia fue creado el primer lenguaje de programación denominado ensamblador (ASM). Siguiendo la sintaxis básica del ensamblador, era más fácil escribir y comprender el código. Las instrucciones en ensamblador consisten en las abreviaturas con significado y a cada instrucción corresponde una localidad de



memoria. Un programa denominado ensamblador compila las instrucciones del lenguaje ensamblador a código máquina, como se ejemplifica en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Lenguaje ensamblador**

### 2.1.1.2. Ventajas de lenguajes de programación de alto nivel

A pesar de todos los lados buenos, el lenguaje ensamblador tiene algunas desventajas:

- Una sola operación en el programa escrito en ensamblador consiste en muchas instrucciones, haciéndolo muy largo y difícil de manejar.
- Cada tipo de microcontrolador tiene su propio conjunto de instrucciones que un programador tiene que conocer para escribir un programa.
- Un programador tiene que conocer el hardware del microcontrolador para escribir un programa.

En lenguajes de programación de alto nivel varias instrucciones en ensamblador se sustituyen por una sentencia, esto se ejemplifica en la figura 2.3.



**Figura 2.3. Programa escrito en C (El mismo programa compilado al código ensamblador)**

### 2.1.1.3. Lenguaje C

El lenguaje C dispone de todas las ventajas de un lenguaje de programación de alto nivel y le permite realizar algunas operaciones tanto sobre los bytes como sobre los bits (operaciones lógicas, desplazamiento, etc.). Las características de C pueden ser muy útiles al programar los microcontroladores. Además, C está estandarizado (el estándar ANSI), es muy portable, así que el mismo código se puede utilizar muchas veces en diferentes proyectos. Lo que lo hace accesible para cualquiera que conozca este lenguaje sin importar el propósito de uso del microcontrolador. C es un lenguaje compilado, lo que significa que los archivos



- **Transferencia en Serie:** en este modo de transferencia el puerto utiliza una única línea por la que, en intervalos de tiempo diferentes, se transmiten, uno a uno, todos los bits del dato.

### **2.1.3. Convertidor analógico y digital**

#### **Convertidor A/D (CAD)**

Las señales externas son muy diferentes de las que “entiende” el microcontrolador (solamente 0V y 5V), así que deben ser convertidas para que el microcontrolador pueda entenderlas. Un convertidor analógico-digital es un circuito electrónico encargado de convertir las señales continuas en números digitales discretos. En otras palabras, este circuito convierte un número real en un número binario y se lo envía a la CPU para ser procesado. Este módulo se utiliza para medir la tensión en el pin de entrada (tensión analógica).

El resultado de esta medición es un número (el valor digital) utilizado y procesado más tarde en el programa.

#### **Convertidor D/A (CDA)**

Transforma los datos digitales obtenidos del procesamiento del microcontrolador en su correspondiente señal analógica que saca al exterior por uno de los puertos del chip.

### **2.1.4. Conceptos básicos del microcontrolador MSP430**

El MSP430 es un microcontrolador de 16 bits muy versátil, que puede realizar operaciones para 8 y 16 bits, presenta un modelo de programación fácil de

aprender y un mapa de memoria que no requiere de paginación, los modos de direccionamiento que maneja permiten que se puedan usar con cualquier instrucción y en cualquier dirección de memoria. Esta familia de microcontroladores está diseñada específicamente para aplicaciones que requieran ser portátiles ya que se alimenta con 3V y tiene formas de operación de muy bajo consumo de energía. En la figura 2.5 se muestra el diagrama a bloques y en la figura 2.6 se muestra la configuración de las terminales del MSP430F2274.

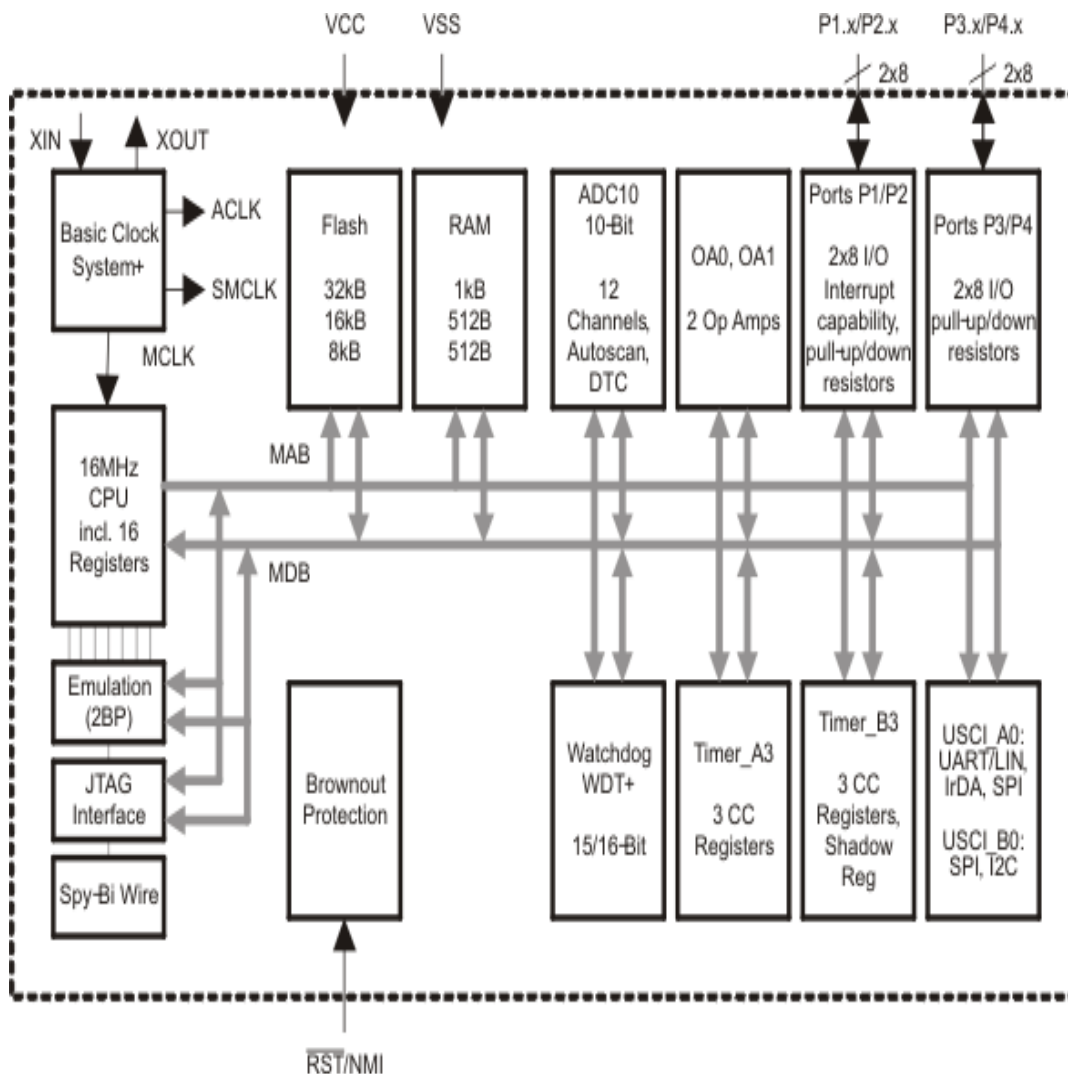


Figura 2.5. Diagrama a bloques del MSP430 F2274

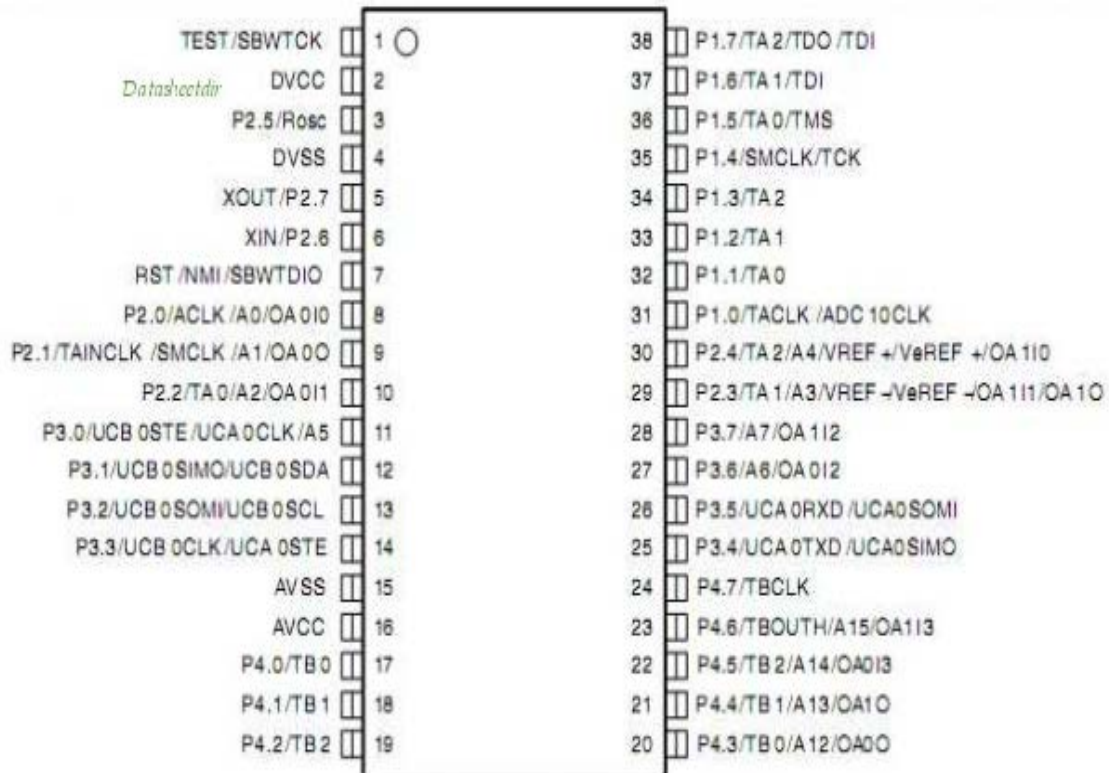


Figura 2.6. Diagrama de pines del microcontrolador MSP430F2274

## 2.2. Refrigeración comercial

La necesidad de conservar y alargar el tiempo de vida de los alimentos ha llevado al hombre de hacer uso de la refrigeración, esta tiene muchas ventajas sobre el enlatado, el secado o el curado debido a que permite a los alimentos conservar su frescura y todo su valor nutritivo. La refrigeración retarda el proceso de descomposición natural realizado por las bacterias, enzimas y hongos, retardando a estos, pero no eliminándolos, por lo que el almacenamiento no debe ser indefinido.

El primer refrigerador del siglo XIX usaba hielo para enfriar su interior y en 1856 surgió el primer refrigerador por compresión de vapor y se utilizó para enfriar

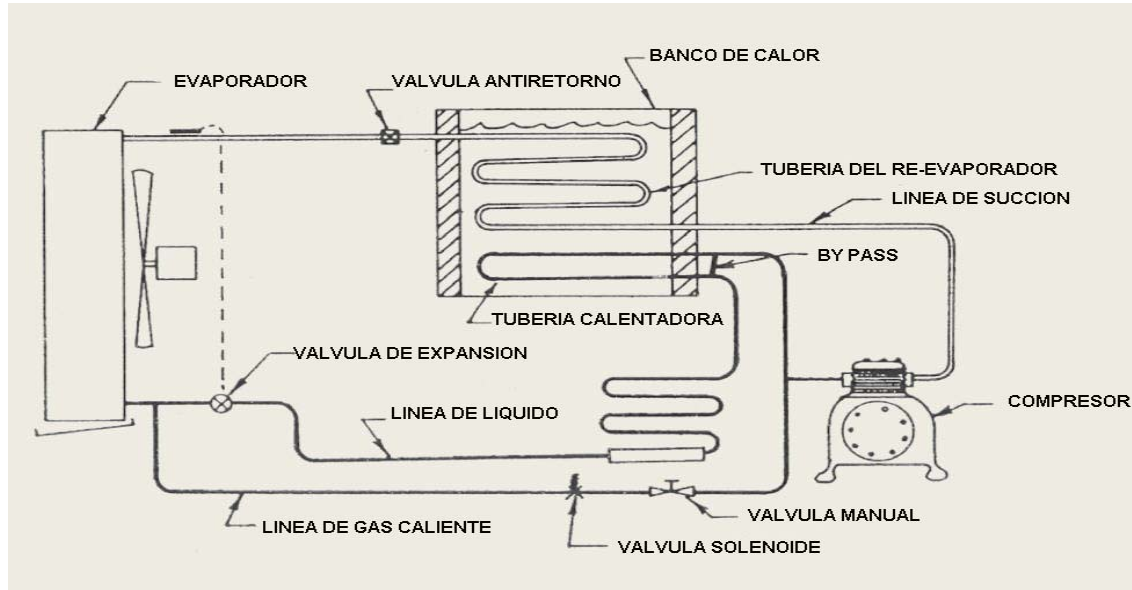
cerveza, con el paso del tiempo se fueron desarrollando nuevos y más pequeños motores y compresores hasta llegar a los sistemas actuales. La refrigeración constituye una necesidad moderna para el hogar, de tal forma que el refrigerador doméstico constituye el 25% y el 50% del consumo energético de hogares, este permanece encendido y operando las 24 horas del día.

De acuerdo con lo anterior se puede definir que la refrigeración comercial trata del diseño, instalación y mantenimiento de aparatos de refrigeración para el hogar, almacenes, tiendas, restaurantes, hoteles e instituciones para el almacenaje, exhibición, procesado y expedición de artículos perecederos.

### **2.2.1. Funcionamiento de un enfriador**

Para poder describir el funcionamiento de un enfriador debemos saber en qué consiste la refrigeración, esta consiste en reducir y mantener la temperatura de un espacio dado por debajo de la temperatura ambiente para la conservación de los alimentos.

El trabajo del ciclo de refrigeración es remover calor no deseado de un lugar aislado del medioambiente y descargarlo en otra forma controlada a través de los cambios físicos del refrigerante de vapor a líquido y de líquido a vapor. Para alcanzar esto el refrigerante es recirculado a través de un circuito totalmente hermético. El ciclo básico de refrigeración puede llegar a ser muy complejo pero los componentes básicos para su operación son pocos. En la figura 2.7. se muestra un esquema básico de un circuito de refrigeración.



**Figura 2.7. Esquema con los componentes básicos de un circuito de refrigeración**

Sus partes básicas son:

- El compresor. Equipo mecánico que comprime el refrigerante en forma de vapor, incrementando así su presión y temperatura, para posteriormente ser transportado por la tubería en forma de gas caliente hasta el condensador. El compresor es accionado por un motor eléctrico
- Los conductos de intercambio de calor o mejor conocida como condensador que nos proporcionan el área de transferencia de calor, elimina el calor en el refrigerante, en fase gaseosa, proveniente del compresor, convirtiéndolo en una mezcla (líquido y gas) y eliminando el calor removido del espacio refrigerado, por lo que éste se ubica en el exterior del recinto
- Válvula de expansión. Dispositivo mecánico que al pasar el refrigerante proveniente del condensador, baja su presión, de forma que éste sale de la válvula en forma de gas a baja temperatura y baja presión, para seguir su camino por la tubería hacia el evaporador



- El refrigerante: es el líquido que se evapora dentro del refrigerador para bajar la temperaturas

El funcionamiento es el siguiente El compresor comprime el gas refrigerante. Esto aumenta la presión del refrigerante y la temperatura, por lo que los conductos de intercambio de calor fuera del circuito permiten que el refrigerante disipe el calor de la presurización.

Según se enfría, el refrigerante se condensa en un líquido y fluye a través de la válvula de expansión.

Cuando fluye por la válvula de expansión, el líquido es permitido para que circule desde la zona de alta presión a una zona de baja presión, por lo que se expande y se evapora. En esta evaporación, absorbe el calor haciendo que el entorno se enfríe. Las bobinas dentro del refrigerador permiten que el refrigerante absorba el calor, haciendo que dentro del refrigerador la temperatura disminuya. Entonces el ciclo se repite.

### **2.2.2. Tipos de enfriadores**

En el caso de una PYME (pequeña y mediana empresa), los equipos son por lo general refrigeradores comerciales de diversas formas y tamaños. Son muy pocas las que utilizarán equipos más grandes que requieran cuartos fríos completos o que utilicen tecnologías de alta eficiencia, como enfriadores tipo chillers o sistemas paralelos de compresores y condensadores con capacidades variables y de alta eficiencia.

### 2.2.2.1. Refrigerador

Son electrodomésticos que utilizan compresores recíprocos herméticos de 1/10 a 1/2 HP con evaporadores de placa con deshielo manual o automático. Debido a que el compresor, evaporador y condensador están en el mismo equipo, se les llama también unidades auto contenidas y si se encuentran generalmente en los hogares.

Los modelos más eficientes son los de 14 a 20 pies cúbicos y cuentan con un congelador en la parte superior o en la inferior, con una puerta de acceso independiente. Modelos sofisticados cuentan con dispensadores de hielo o agua helada, termómetros y doble puerta vertical, pero con mayores consumos de energía. El termostato no indica temperaturas, en la gran mayoría de los modelos, y solo indica con numeración del 0 para apagado y en aumento para indicar que se alcanzan temperaturas bajas un ejemplo se puede ver en la figura 2.8

Se usan para todo tipo de productos y aplicación donde se desee almacenar, por períodos cortos con un mínimo de mantenimiento. Existen refrigeradores que funcionan solo a media temperatura o solo a baja temperatura. A estos últimos se les conoce como congeladores.



**Figura 2.8. Refrigerador**

### **2.2.3. Compresores para refrigeración**

El compresor tiene dos funciones en el ciclo de refrigeración: en primer lugar succiona el vapor del refrigerante y reduce la presión en el evaporador a un punto en el que puede ser mantenida la temperatura de evaporación deseada. En segundo lugar, el compresor eleva la presión del vapor refrigerante a un nivel lo suficientemente alto, de modo que la temperatura de saturación sea superior a la temperatura del medio enfriante disponible para la condensación del vapor refrigerante. Existen tres tipos básicos de compresores: Reciprocantes, Rotativos y Centrífugos y uno especial el de tornillo.

#### **2.2.3.1. Reciprocantes**

Los equipos de refrigeración utilizan principalmente compresores Reciprocantes debido a las altas compresiones que se requieren para las aplicaciones de baja y media temperatura. Así, existen versiones estándares y de alta eficiencia.

Estos compresores son los menos eficientes, pero tienen un costo relativamente menor comparados con otros, aunque son muy ruidosos. Operan al reducir el volumen de un espacio sellado llamado cilindro, por medio de un pistón en movimiento. Debe existir un espacio entre la cabeza del pistón y las válvulas para evitar que choquen las piezas entre sí, por lo que hay una pequeña cantidad de refrigerante que se re-expande y le resta espacio al cilindro durante la aspiración de nuevo refrigerante. A esto se le conoce como eficiencia volumétrica del compresor y depende de la diferencia entre la presión de descarga y la de succión.

Para medir estas variables se establece la “relación de compresión”, la cual consiste en dividir la presión a la salida del compresor con la de la succión, ambas en unidades de presión absoluta. Cuanto mayor sea el número, menor será la eficiencia volumétrica de un compresor dado.

### 2.2.3.2. Compresores herméticos

El motor y el compresor están dentro de una misma carcasa sellada. Son mucho más baratos que cualquier otro tipo, pero son los menos eficientes del mercado en aplicaciones de sistema de refrigeración, ver figura 2.9.



**Figura 2.9. Compresor Hermético**

## 2.2. Transformadores para el uso de reguladores de tensión

### 2.3.1. Tipos de reguladores de tensión

Un regulador de tensión (también llamado estabilizador o acondicionador de tensión) es un dispositivo eléctrico que acepta una tensión variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado para entregar a la salida una tensión compensada o reducida en diferentes porcentajes la tensión de entrada.

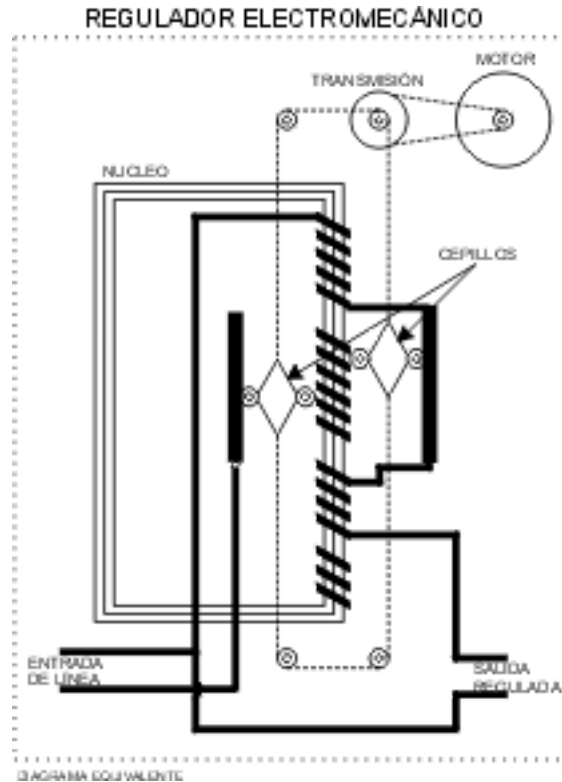
Existen diversos tipos de reguladores de tensión, los más comunes son: para uso doméstico o industrial. Los primeros son utilizados en su mayoría para proteger equipo de cómputo, vídeo, o electrodomésticos. Los segundos protegen instalaciones eléctricas completas, aparatos o equipo eléctrico sofisticado, fábricas, entre otros.

### **2.3.1.1. Principios de funcionamiento**

Existen diversos tipos de reguladores en el mercado, los cuales se clasifican de acuerdo con el principio o tecnología de regulación que utilizan. Los más importantes se describen a continuación.

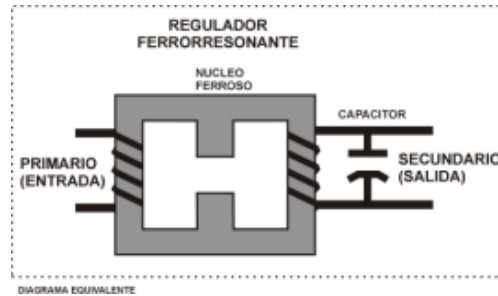
Los Reguladores Electromecánicos basan su principio de funcionamiento en un autotransformador de columna, sobre la cual se dispone un cursor accionado por un servomotor, que en su recorrido suma o resta espiras. Este movimiento de auto ajuste es controlado por un comando electrónico, que se activa cada vez que la tensión de salida se desvía de su valor de calibración, ajustándose automáticamente y con ello mantiene permanentemente la tensión de salida estable, la respuesta es lenta a las variaciones rápidas de tensión. Es decir, este dispositivo consigue una regulación de tensión de línea por medio de la detección de las variaciones presentes mediante un circuito de control que acciona un sistema mecánico que compensa, iguala o decremента el flujo magnético de un autotransformador. En la figura 2.10. se muestra el regulador electromecánico.

Por otro lado existen también los reguladores electrónicos, éstos basan su regulación en un control electrónico, pueden llevar microprocesador para regular o simplemente un circuito de control que detecta las variaciones de la tensión y hace la corrección a través de relevadores para regular la tensión. Su tiempo de respuesta y velocidad de regulación son rápidos además de ser económicos en comparación a los otros tipos. Su diseño propicia que se desconecten para auto protegerse en condiciones extremas de alta y baja tensión, lo que genera costos de mantenimiento haciéndolos equipos de corta duración.



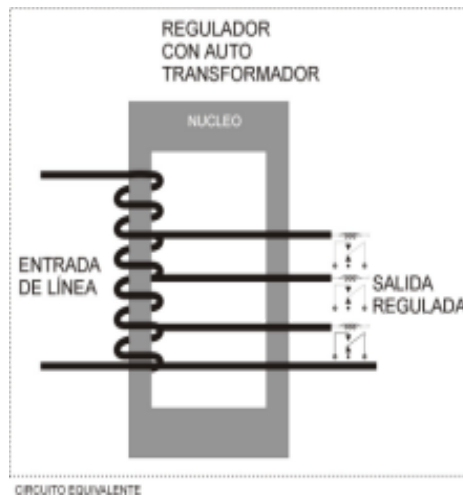
**Figura 2.10. Regulador electromecánico**

Otro tipo de reguladores son los denominados reguladores ferro-resonantes, los cuales se fundamentan en el principio de la ferro-resonancia que es la propiedad del diseño de un transformador en el cual este dispositivo contiene dos patrones magnéticos separados con acoplamiento limitado entre ellos. La salida contiene un circuito resonante paralelo que toma su potencia del primario para reemplazar la potencia entregada a la carga. Hay que notar que la resonancia en la ferro-resonancia es similar a aquella en los circuitos lineales con condensadores o inductores en serie o paralelo, en donde la impedancia tiene un pico a una frecuencia en particular. En un circuito como el que se usa en los transformadores ferro-resonantes, la resonancia se usa para reducir los cambios en la tensión de alimentación para suministrar una tensión más constante a la carga. En la siguiente figura se muestra el regulador ferro-resonante. Ver figura 2.11.



**Figura 2.11. Regulador ferro-resonante**

Se tienen también los Reguladores Electromagnéticos, que poseen como característica principal la operación electrónica y magnética, y su funcionamiento es una combinación de un circuito magnético de alta reactancia, un circuito eléctrico de un transformador o auto transformador y un circuito electrónico de control que puede detectar las variaciones de la tensión de entrada y salida, la compara con una tensión de referencia establecida y cambiando de forma indirecta la densidad del flujo en el área de circuito magnético donde están localizados los devanados de substracción y adición o igualación, regresa la tensión de salida al nivel designado como se muestra a continuación. Ver figura 2.12



**Figura 2.12. Regulador electromagnético**

### **2.3.1.2. Beneficios de contar con un regulador de tensión**

Los principales beneficios son los que a continuación se describen:

- Funcionamiento permanente y seguro de todos sus equipos, las variaciones de tensión de la red eléctrica no afectarán el funcionamiento, la calidad de sus procesos y tiempo de fabricación.
- Eliminar los recursos económicos gastados innecesariamente, aprovechando todo el potencial instalado: recursos técnicos, humanos, materiales, y de tiempo.
- Incremento en la productividad y eficiencia del sistema protegido así como aumento de la vida útil de sus equipos.

### **2.3.1.3. Regulador adecuado**

La capacidad de los reguladores se mide en kVA. Para seleccionar el equipo que se necesita será necesario conocer cuatro puntos importantes:

- Tensión de entrada de los equipos a proteger: es la tensión de salida del regulador y de entrada que requerirá su maquinaria, equipos o instalaciones para su correcto funcionamiento. Puede ser localizado en la placa de datos o manual de instalación del equipo o maquinaria a proteger. La tensión de la red eléctrica variará de un país a otro así como la tensión de alimentación de sus equipos dependiendo de su origen.
- Consumo de los equipos: datos localizados en la placa de datos o manual de instalación del equipo o maquinaria, puede estar expresado en: volts para equipos monofásicos y kilovolts en sistemas trifásicos, amperes en lo que corresponde a corriente y hp en potencia por mencionar algunos.

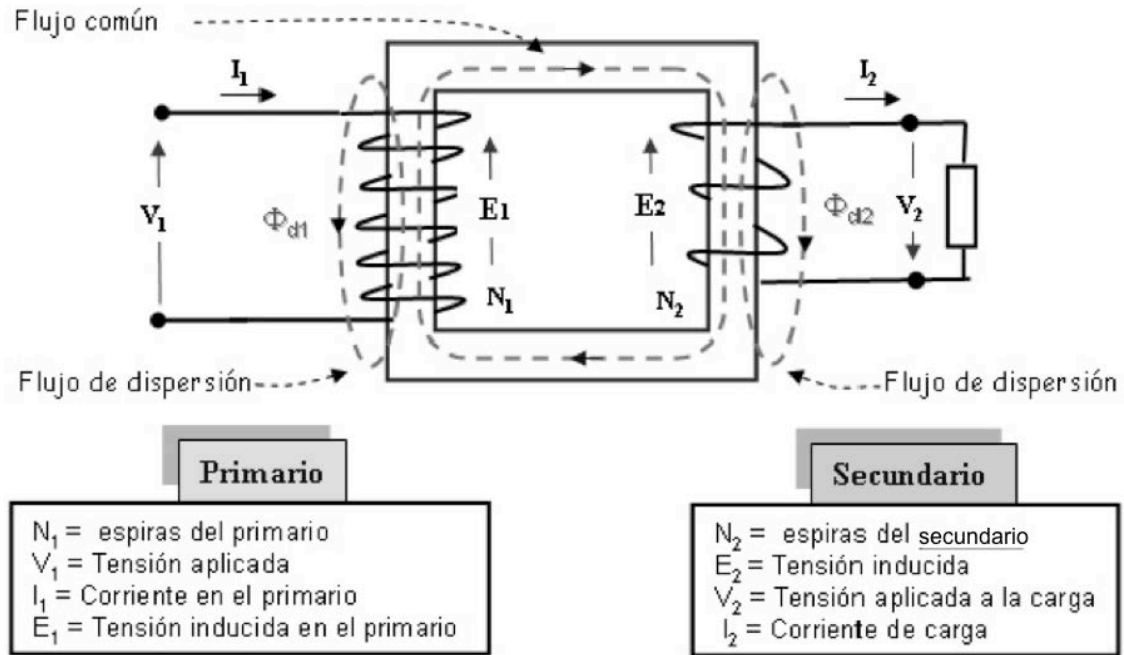


- Campo de regulación del equipo: es la capacidad que tiene el regulador de corregir las variaciones de tensión de la línea eléctrica (precisión de salida en rango de variación de entrada). Para este caso es necesario monitorizar o dibujar la gráfica de la tensión de la línea de alimentación para determinar los límites máximo y mínimo de variación de la línea.
- Número de fases de alimentación de los mismos: se determina a través de la placa de datos o manual de instalación del equipo o maquinaria a proteger. Los sistemas eléctricos convencionales pueden ser: monofásicos, bifásicos con neutro, bifásicos sin neutro (para equipos 3 monofásicos de 220 V), trifásicos.

En los equipos de refrigeración se utilizan los reguladores de tensión electromagnéticos, ya que protegen contra condiciones de muy baja o alta tensión de línea comercial. Lo cual permite que el refrigerador continúe operando normalmente bajo esas condiciones y protegiéndolo de un daño seguro o contra una pérdida total de funcionamiento.

### **2.3.2. Características de transformadores y autotransformadores**

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de tensiones y corrientes. Ver figura 2.13.



**Figura 2.13. Transformador**

El transformador es un aparato electromagnético que realiza las siguientes funciones:

- Elevar o reducir la tensión o la corriente.
- Actuar como un dispositivo acoplador de impedancias.
- Aislar una parte de la red de otra.

### 2.3.2.1. Teoría del funcionamiento de un transformador

El funcionamiento del transformador se resume de la siguiente manera:

1. Cuando se conecta el primario a un fuente de FEM (fuerza electromotriz) alterna, por el embobinado comienza a pasar una corriente alterna.

2. En cuanto fluye una corriente por un conductor se crea un campo magnético alrededor de él. Si la corriente cambia continuamente en magnitud y la polaridad, el campo magnético que se origina en el núcleo de hierro hará lo mismo.
3. El campo magnético alterno está, por tanto, continuamente expandiéndose y contrayéndose. Como el circuito magnético es cerrado, la variación del campo magnético es la misma en cualquier parte del núcleo.
4. Las líneas magnéticas al expandirse y contraerse cortarán a los conductores situados en cualquier parte del núcleo, y de acuerdo con el experimento de Faraday, en éstos aparecerá una FEM inducida.
5. Como a cada conductor sobre el núcleo le corta el mismo flujo, la FEM inducida por vuelta será la misma. Por tanto, la tensión en cada embobinado será proporcional al número de vueltas; expresado matemáticamente, esto es:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Despejamos y encontramos la fórmula siguiente:

Entonces:

$$V_s = \frac{N_s \cdot V_p}{N_p} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Un transformador puede ser “elevador o reductor” dependiendo del número de vueltas de cada embobinado

6. Se nota en la ecuación 2.2 que la tensión del secundario aumenta o disminuye eligiendo una relación de vueltas.

Un transformador es un dispositivo capaz de variar los valores de tensión y corriente de un nivel a otro nivel sin variar la frecuencia, solamente mediante acoplamiento magnético.

Su importancia reside en el hecho de que al aumentar la tensión se reduce la corriente y esto lo hace indispensable en los sistemas de potencia para transmitir energía eléctrica a grandes distancias disminuyendo las pérdidas.

### 2.3.2.2. Transformador ideal

Un transformador ideal es un artefacto sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida. Las relaciones entre las tensiones de entrada y de salida, y entre la corriente de entrada y de salida, se establece mediante dos ecuaciones sencillas. La figura 2.14 muestra un transformador ideal y la 2.15 su esquema.

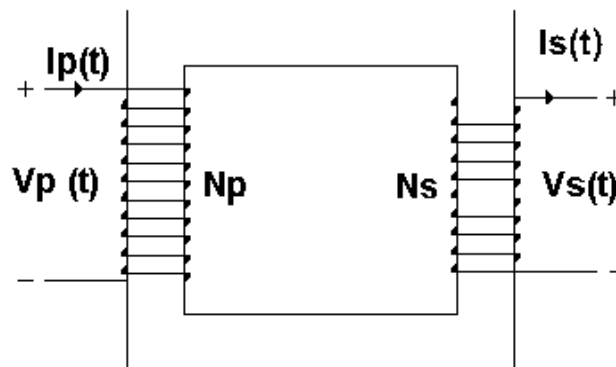
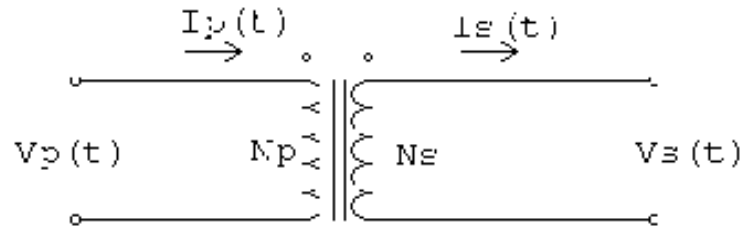


Figura 2.14. Transformador ideal



**Figura 2.15. Esquema de un transformador ideal**

En el transformador que se muestra en la figura 2.14 tiene  $N_p$  vueltas o espiras de alambre sobre su lado primario y  $N_s$  de espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre la tensión  $V_p(t)$  aplicado al lado primario del transformador y la tensión  $V_s(t)$  inducido sobre su lado secundario es:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

En donde “a” se define como la relación de espiras del transformador:

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

La relación entre la corriente  $I_p(t)$  que fluye en el lado primario del transformador y la corriente  $I_s(t)$  que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es:

$$N_p \cdot I_p(t) = N_s \cdot I_s(t) \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

$$\frac{I_p(t)}{I_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

En términos de cantidades fasoriales, estas ecuaciones son

$$\frac{V_p}{V_s} = a \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

### 2.3.3. Potencia de los transformadores

Si se supone que el transformador es ideal (la potencia que se le entrega es igual a la que se obtiene de él, se desprecian las pérdidas por disipación de calor y otras), entonces:

$$\textit{Potencia}_{\textit{Entrada}} = \textit{Potencia}_{\textit{Salida}}$$

$$P_e = P_s \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Con los datos de corriente y tensión de un dispositivo, se obtiene su potencia utilizando la siguiente ley de Joule:

$$\textit{Potencia} = \textit{Diferencia\_de\_potencial} \cdot \textit{Corriente}$$

$$P = V \cdot I [\text{W}] \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

La potencia suministrada al transformador por el circuito primario se expresa por medio de la ecuación:

$$P_{ent} = V_p \cdot I_p \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

En donde  $\theta$  es el ángulo entre la tensión y la corriente primaria. La potencia que el circuito secundario suministra a sus cargas se establece por la ecuación:

$$P_{sal} = V_s \cdot I_s \cdot \cos\theta \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

En donde  $\theta$  es el ángulo entre la tensión y la corriente del secundario. Puesto que los ángulos entre la tensión y la corriente no se afectan en un transformador ideal. Las bobinas primaria y secundaria de un transformador ideal tienen el mismo factor de potencia.

La potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada.

$$P_{sal} = V_p \cdot I_p \cdot \cos\theta = P_{ent} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

La misma relación se aplica a la potencia reactiva Q y la potencia aparente S.

$$Q_{ent} = V_p \cdot I_p \cdot \sin\theta = V_s \cdot I_s \cdot \sin\theta = Q_{sal} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

$$S_{ent} = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s = S_{sal} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

La eficiencia de un transformador es la relación de potencia de salida con la potencia de entrada:

$$\% \text{eficiencia} = \frac{\text{Potencia}_{\text{Salida}}}{\text{Potencia}_{\text{Entrada}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Las pérdidas en los devanados reciben el nombre de pérdidas en el cobre y se deben principalmente al paso de la corriente eléctrica en los devanados.

Las pérdidas en el núcleo consisten en calentamiento producido por el fenómeno de histéresis y por corrientes parásitas que se inducen en las láminas del núcleo, generalmente denominadas pérdidas en vacío.

$$\text{Potencia}_{\text{entrada}} = \text{Potencia}_{\text{salida}} + \text{Pérdidas}$$

Pérdidas en el núcleo “ $P_o$ ”

$$P_o = P_h + P_e \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

$P_h$  = Pérdidas por histéresis

$P_e$  = Perdidas por corrientes parásitas

### 2.3.3.1. Los autotransformadores

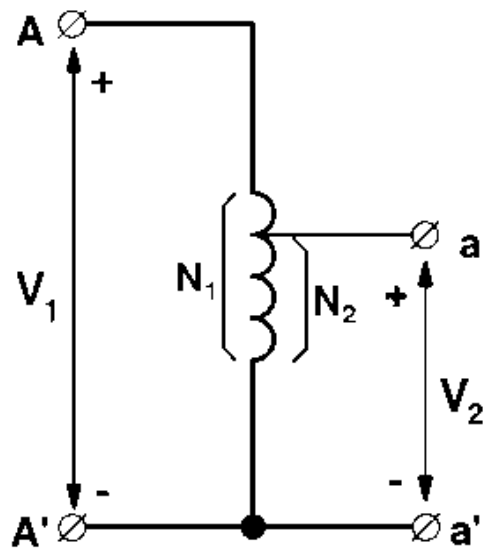
Un autotransformador es un transformador especial que para cada fase tiene un único devanado que actúa a la vez de primario y secundario, esto debido a su pequeña tensión relativa de circuito corto  $V_{cc}$  (tensión expresada en % de la tensión nominal, a la que es preciso aplicar al primario para hacer circular la corriente nominal por el secundario, estando en circuito corto).

Al tener un solo devanado para el primario y el secundario un autotransformador es más barato que un transformador convencional y, además, tiene menos pérdidas, esto es, mejor rendimiento.

La tensión relativa de circuito corto  $V_{cc}$  de un autotransformador es pequeña, lo cual tiene la ventaja de que en él se producen unas caídas de tensión muy bajas; pero presenta el gran inconveniente de que en el caso de producirse un circuito corto aparecen corrientes de falla (corriente que circula debido a un defecto de aislamiento) muy elevadas.



El principal inconveniente de un autotransformador es que no existe aislamiento entre los circuitos primario y secundario de cada fase. En un transformador normal los dos devanados de una fase están aislados entre sí. Son circuitos que están ligados a través de un campo magnético, pero eléctricamente están separados. Sin embargo en un autotransformador este aislamiento no existe; pues se trata del mismo devanado que actúa a la vez como primario y como secundario. En la figura 2.16 se muestra el esquema de un autotransformador.



**Figura 2.16. Símbolo esquemático de un autotransformador**

Para explicar el funcionamiento del autotransformador tenemos lo siguiente:

- $N_1$     Número de espiras del devanado serie
- $N_2$     Número de espiras del devanado derivación
- $(N_1 + N_2)$     Número de espiras primarias del autotransformador
- $K_{auto}$     Relación de transformación del autotransformador
- $Z_1$     Impedancia de dispersión del devanado serie
- $Z_3$     Impedancia de dispersión del devanado derivación

- $I_1$  Corriente del devanado serie (entrada)
- $I_2$  Corriente en la carga
- $I_3$  Corriente en el devanado derivación (común)

Lo anterior se ejemplifica en la figura 2.17.

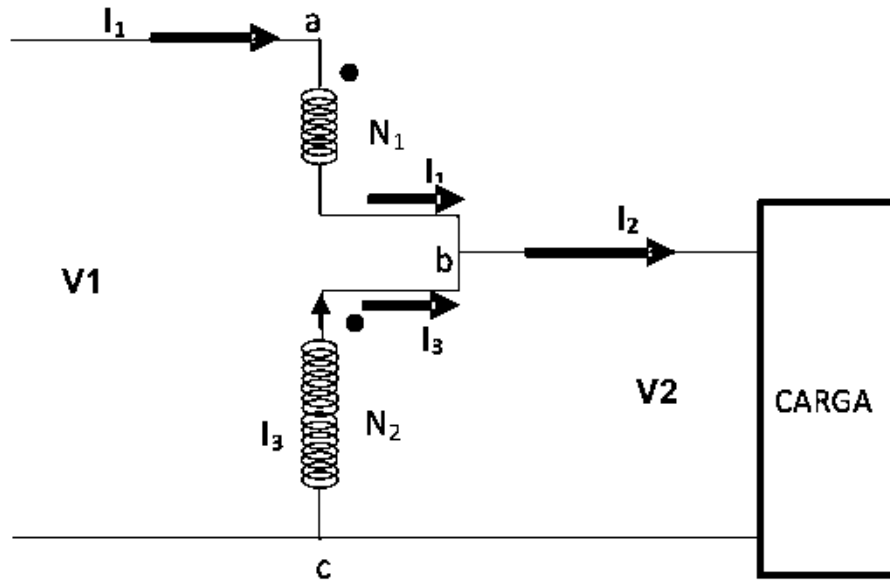


Figura 2.17. Símbolo esquemático de un autotransformador

Relación de espiras como transformador (devanado serie al de derivación)

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{(Ecuación 2.18)}$$

Relación de espiras como autotransformador:

$$K_{auto} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = a + 1 \quad \text{(Ecuación 2.19)}$$

Relaciones entre las corrientes:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_3 \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Al despreciar la corriente de vacío ( $I_0$ ):

$$N_1 I_1 + N_2 I_3 = 0 \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Relación entre la corriente del devanado primario y derivación:

$$I_1 = -\frac{I_3}{a} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Se tiene el balance de potencias aparentes entrante y saliente, considerando pérdidas nulas.

$$V_1 I_1 = -V_2 I_2 \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

$$\frac{V_1}{V_2} = K_{\text{auto}} = -\frac{I_2}{I_1} \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

$$I_1 = -\frac{I_2}{K_{\text{auto}}} \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

La relación entre la corriente del devanado derivación y la de carga se obtiene de las ecuaciones anteriores eliminando  $I_1$

$$\frac{I_3}{a} = \frac{I_2}{K_{\text{auto}}} \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

$$a = K_{auto} - 1 \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

Relación entre la corriente del devanado serie y de carga

$$I_3 = \frac{(K_{auto} - 1)}{K_{auto}} I_2 \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

Potencia de la carga:

$$P_c = V_2 I_2 \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

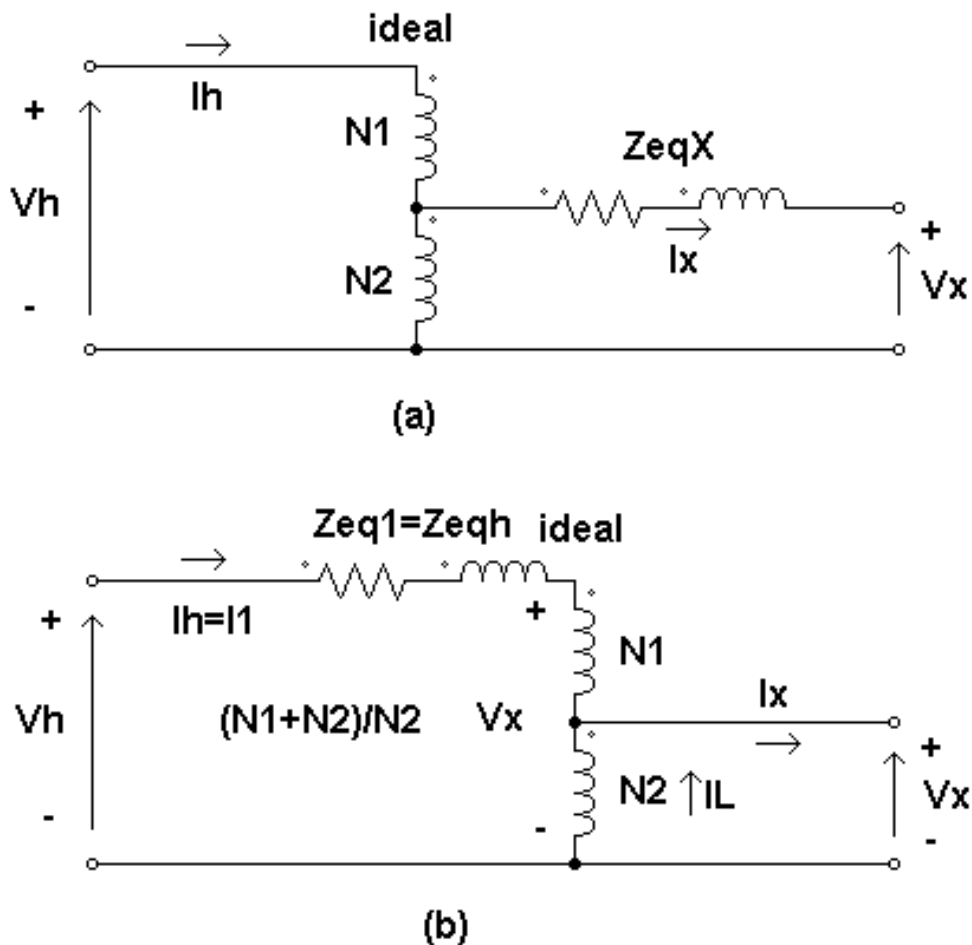
El autotransformador no sólo presenta menores pérdidas que el transformador normal, sino que su menor tamaño y peso permiten el transporte de potencias superiores.

Existen autotransformadores con varias tomas en el secundario y por lo tanto, con varias relaciones de transformación. De la misma manera que los transformadores, los autotransformadores también se equipan con cambiadores de toma automáticos para utilizarse en sistemas de transmisión y distribución para regular la tensión de la red eléctrica.

Con la incorporación de varias tomas, se obtiene más de un valor para la tensión del secundario e incluso obtener tensiones ligeramente mayores a los de la fuente, para ello, el devanado debe construirse para que su tensión nominal sea ligeramente mayor que el del lado fijo o primario. Existen autotransformadores en los que la toma secundaria se logra a través de una escobilla deslizante, permitiendo una gama continua de tensiones secundarias que van desde cero hasta la tensión de la fuente.

**2.3.3.2. Corriente de excitación**

La corriente de excitación tiene menos importancia cuando el transformador funciona como autotransformador que cuando lo hace como transformador de dos circuitos. Si las tensiones de los devanados tienen sus valores nominales a carga nula, el flujo en el núcleo tiene su valor nominal y los ampere-espira totales en vacío son los mismos tanto si el transformador está conectado como autotransformador como si lo está como transformador ordinario de dos circuitos. Ver figura 2.18.



**Figura 2.18. Circuitos equivalentes aproximados de un autotransformador**

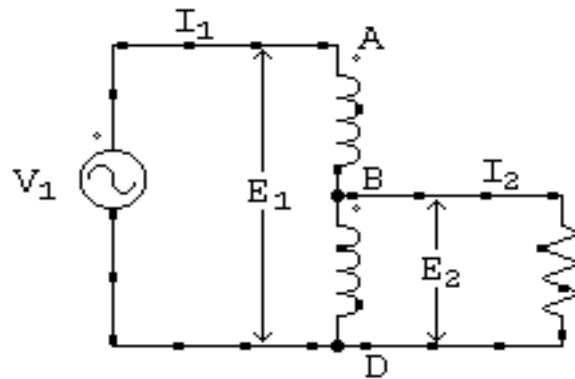
La corriente de excitación varía inversamente con el número de espiras por las que circula la corriente de excitación. Como las tensiones nominales son proporcionales a los números de espiras, los volt-ampere de excitación a la tensión normal son los mismos tanto si el transformador está conectado como autotransformador como si está como transformador ordinario de dos circuitos.

Esta relación es aplicable a un transformador dado conectado como autotransformador o como transformador de dos circuitos. Es solo aproximadamente la razón de la corriente de excitación de un autotransformador a la de un transformador de dos circuitos diferentes, pero de igual valor nominal, ya que el porcentaje de la corriente de excitación en los diseños normales varía algo como el tamaño.

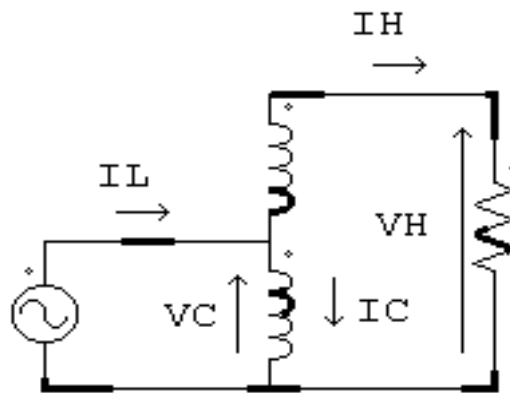
El despreciar la corriente de excitación en un transformador ordinario de dos circuitos suele introducir un error pequeño, excepto en el análisis de problemas relacionados directamente con los fenómenos de excitación, especialmente de aquellos en los que interviene el comportamiento de los armónicos. Como por lo general, la corriente de excitación de un transformador es muy débil, el despreciarla introduce un error aún menor.

### **2.3.3.3. Funcionamiento con carga**

Al conectar una impedancia  $Z$  entre los puntos B y D, tal como lo muestra las Figuras 2.19 y 2.20, sin entrar en consideraciones sobre el carácter de  $Z$ , se producirá una variación en las condiciones de funcionamiento.  $Z$  puede tener carácter óhmico, inductivo o capacitivo. Al conectarla entre dos puntos que causan una diferencia de potencial, circulará una corriente que llamamos  $I_2$ , con subíndice correspondiente a secundario.



**Figura 2.19. Autotransformador reductor**



**Figura 2.20. Autotransformador elevador**

En el tramo BD donde existen dos corrientes encontradas sucede que sólo circulará la diferencia entre ambas, es decir, que en el tramo secundario del embobinado circula una corriente:

$$I_{BD} = I_2 - I_1 \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

Esta diferencia debe tener carácter vectorial. En una sección del embobinado circula sólo la diferencia de las corrientes primaria y secundaria. Quiere decir que

en el tramo A B se tiene la corriente  $I_1$ ; en el BD existe la diferencia  $(I_2 - I_1)$  y, en el circuito de carga está la corriente  $I_2$ . En estas consideraciones se prescinde de la corriente de vacío, porque es de valor muy pequeño comparada con la primaria de carga. Procediendo así se tienen simplificaciones importantes.

De la relación entre las corrientes primaria y secundaria. Se elimina la corriente magnetizante, por su pequeñez, entonces al despreciar  $I_0$ :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

Que por simple cambio de miembro de sus factores permite escribir:

$$\frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} = k \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

Relación inversa a la de tensiones o FEM. Ahora para saber la relación entre las corrientes circulantes en la sección superior e inferior del bobinado, se procede de la siguiente manera:

En primer lugar, tenemos:

$$I_{BD} = I_2 - I_1 \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

Al dividir esta ecuación por la corriente primaria, o sea por la corriente que circula entre A y B, se tiene:

$$\left(\frac{I_{BD}}{I_{AB}}\right) = \left(\frac{I_2}{I_{AB}}\right) - \left(\frac{I_1}{I_{AB}}\right) \quad (\text{Ecuación 2.34})$$



El primer término es el cociente entre las corrientes; el segundo término es la relación de transformación., pues el denominador es la corriente  $I_1$ , y el tercer término es la unidad, por ser iguales el numerador y denominador. Luego, se tiene:

$$\left( \frac{I_{BD}}{I_{AB}} \right) = k - 1 \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

relación cuyo primer miembro es inverso al similar que se obtuvo para las tensiones, pues el segundo miembro de ésta es igual al de la expresión que daba la relación entre las FEM de las secciones superior e inferior.

Si se consideran aisladamente las dos expresiones que han dado por resultado  $(k - 1)$ , que son los cocientes entre las FEM entre puntos AB y BD, y las corrientes circulantes entre BD y AB, se supone al autotransformador como equivalente de un transformador que en lugar de  $k$ , tenga una relación de transformación  $(k - 1)$ , y cuyo primario sea la sección superior AB y cuyo secundario sea la sección BD. Esto es importante en lo que respecta a la transferencia de energía desde la red al circuito de carga en el secundario, pues en ese aspecto, parte de la energía se transfiere por vía electromagnética, como en los transformadores, y parte por vía eléctrica directa, como en un circuito cerrado simple de corriente alterna. La parte que transfiere energía por vía electromagnética es la AB. que obra como primario ficticio, y la parte que la recibe transferida es la BD, secundario ficticio.

#### **2.3.3.4. Ventajas del autotransformador**

A continuación se enlistan las principales ventajas que se tienen al utilizar un autotransformador en lugar de un transformador.

- Menor dimensiones del núcleo magnético para una misma potencia.
- Menor peso y tamaño.

- Un autotransformador es más barato que un transformador de dos embobinados de la misma capacidad e igual relación de transformación.
- Necesitan una menor cantidad de cobre que los transformadores ya que solo tienen  $N_1$  vueltas de hilo mientras que en los transformadores el número de vueltas es de  $N_1 + N_2$ . Además al circular una corriente menor ( $I_2 - I_1$ ) por el arrollamiento común los arrollamientos de cobre serán más finos para una densidad de corriente similar.
- Las pérdidas en el cobre disminuirán al haber menos cantidad de éste.
- Ahorro de hierro debido a que al tener una menor cantidad de cobre será necesario menos espacio para alojar el bobinado (dimensiones de la ventana).
- Menos pérdidas en el hierro ya que éstas son directamente proporcionales al volumen de hierro y al reducir éste las pérdidas también se reducirán.
- Aumento del rendimiento al reducir las pérdidas en el hierro y en el cobre.
- Más fácil transporte al tener menor volumen.
- El flujo disperso es menor, ya que el flujo disperso es aquel que concatena a un arrollamiento pero no concatena a otro; en este caso el flujo de dispersión del secundario concatena (aunque sea parcialmente) al primario. Al ser menor el flujo de dispersión se reducen las caídas de tensión en carga.

#### **2.3.3.5. Inconvenientes del autotransformador**

- No existe separación galvánica del primario y el secundario. El ahorro obtenido se sacrifica hasta cierto punto por la seguridad del personal, por el hecho de que un autotransformador no hay aislamiento eléctrico entre la fuente y la carga (primario y secundario).
- Un cortocircuito en el bobinado redundará en una sobretensión a los receptores.

- Una desventaja adicional del autotransformador la constituye su impedancia interna. La menor impedancia del autotransformador comparada con la correspondiente a un transformador convencional de dos devanados, puede ser un problema serio en algunas aplicaciones en que se requiere que la impedancia serie limite la corriente de circuito corto el sistema de potencia.

#### **2.3.3.6. Calentamiento**

El calentamiento en una máquina o elemento eléctrico viene dado por la cantidad de potencia disipada, en este caso la resistencia tiene una impedancia real, y al contrario de la capacitancia y inductancia estas tienen componente real y compleja. En el cual esto no quiere decir que porque estas tengan componente real o imaginaria no induzcan y produzcan pérdidas, pues estas también hacen de una u otra forma generar corriente, que sí se inducen en el devanado del transformador las cuales también generan pérdidas en sí mismo en forma de calor en el transformador.

#### **2.4. Sensores de temperatura para termostatos**

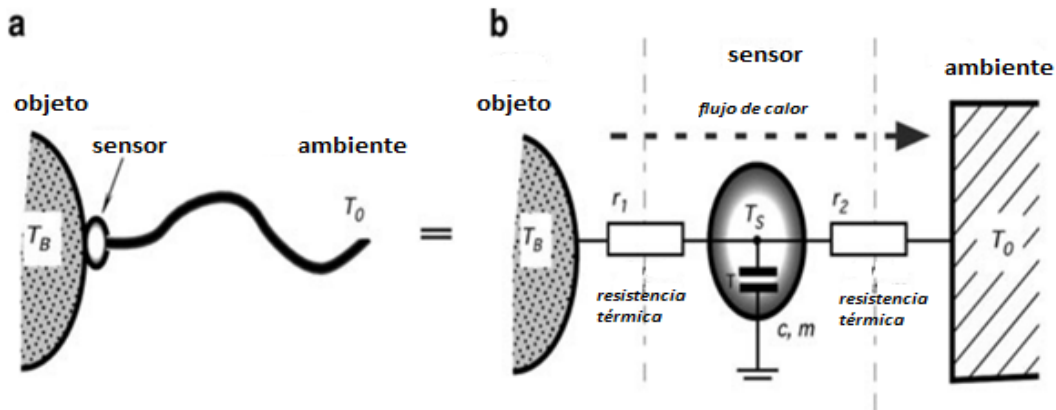
Medir temperatura esencialmente requiere de la transmisión de una pequeña porción de la energía térmica del objeto hacia el sensor cuya función es convertir esa energía en una señal eléctrica. Cuando un sensor de contacto es colocado dentro de un objeto, da lugar a la conducción de calor entre los límites del objeto y el sensor. El mismo comportamiento se tiene cuando el calor se transmite como radiación, la energía térmica en forma de luz infrarroja es intercambiada entre el objeto y el sensor. Cualquier sensor sin importar que tan pequeño sea deformará las mediciones y esto causará un cierto error en las lecturas. Esto aplica a cualquier método de censado: conductivo, convectivo y radiativo. Por lo tanto es una tarea importante minimizar el error mencionado usando un apropiado diseño

de sensor y una correcta técnica de medición de temperatura entre el objeto y el sensor.

Cuando un sensor de temperatura responde al calor se pueden emplear dos métodos básicos de procesamiento de señales: predictivo y equilibrado. En el método de equilibrado la medición de temperatura queda completada de inmediato ya que no existe un gradiente de temperatura significativo entre la superficie medida y el sensor. En otras palabras, se alcanza un equilibrio térmico cuando la energía intercambiada entre el sensor y el objeto llega a ser despreciable. En el método predictivo el equilibrio no se alcanza durante el tiempo que dura la medición. El nivel de equilibrio se predice vía el cálculo de cambio de temperatura del sensor. Después del primer contacto con el sensor alcanzar el equilibrio térmico puede ser un proceso lento, especialmente si el área de contacto está seca. Por lo tanto el proceso de eculización de la temperatura puede tomar mucho tiempo. Por ejemplo un termómetro electrónico de uso médico puede tomar la temperatura de una tina de agua en aproximadamente 5 segundos (buen acoplamiento térmico), pero puede tomar hasta 3 minutos cuando la temperatura es tomada en la axila por el mismo sensor (mal acoplamiento térmico).

Para dejar en claro, si un sensor es colocado no solo al objeto al cual se tomará la medición, sino también a otros objetos se introduce un error. Para asegurar una buena medición un sensor de temperatura siempre es conectado a algo más aparte del objeto de medición, un ejemplo sería un cable de conexión (figura 2.21 a), el sensor es acoplado al objeto. Después del acoplado o antes de que la temperatura empiece a cambiar la temperatura del sensor en cualquier momento es  $T_S$  mientras que la temperatura del objeto tiene una temperatura real  $T_B$ , por lo regular esas temperaturas no son iguales. El objetivo de la medición es llegar a que  $T_B$  y  $T_S$  sean tan cercanas como sea posible. En cualquier sistema práctico, una punta del cable es conectada al sensor mientras que la otra es sometida a una temperatura diferente, por ejemplo a temperatura ambiente  $T_0$  que puede ser un poco diferente de la temperatura del objeto. El cable conduce ambas señales

eléctricas y algo de calor de o hacia el sensor. La figura 2.21 b muestra el circuito térmico que incluye el objeto, el sensor, el ambiente y las resistencias térmicas  $r_1$  y  $r_2$ . La resistencia térmica representa la habilidad de un material para conducir energía térmica y es inversamente proporcional a la conductividad térmica, esto es:  $r=1/\alpha$ . Si un objeto es más caliente que el ambiente el calor fluye en la dirección indicada por las flechas de la figura 2.21.



**Figura 2.21. El sensor de temperatura tiene contacto térmico con el objeto y el cable de conexión (a); Circuito térmico equivalente (b)**

El circuito de la figura 2.21b se asemeja a un circuito eléctrico y en efecto sus propiedades pueden ser evaluadas usando leyes de circuitos eléctricos tales como las de Kirchhoff y la de Ohm. Asumiendo que podemos esperar lo suficiente y que todas las temperaturas se establecieron en algún nivel de estado estacionario, y también asumiendo que las temperaturas del objeto y del ambiente son estables y no son afectadas por su interconexión con el sensor por algún estado estacionario, se puede aplicar la ley de la conservación de la energía. Considerando que la energía térmica que fluye del objeto hacia el sensor es igual a la energía que sale del sensor al ambiente. Esto permite que se pueda dar la siguiente ecuación:

$$\frac{T_B - T_S}{r_1} = \frac{T_B - T_0}{r_1 + r_2} \quad (\text{Ecuación 2.36})$$

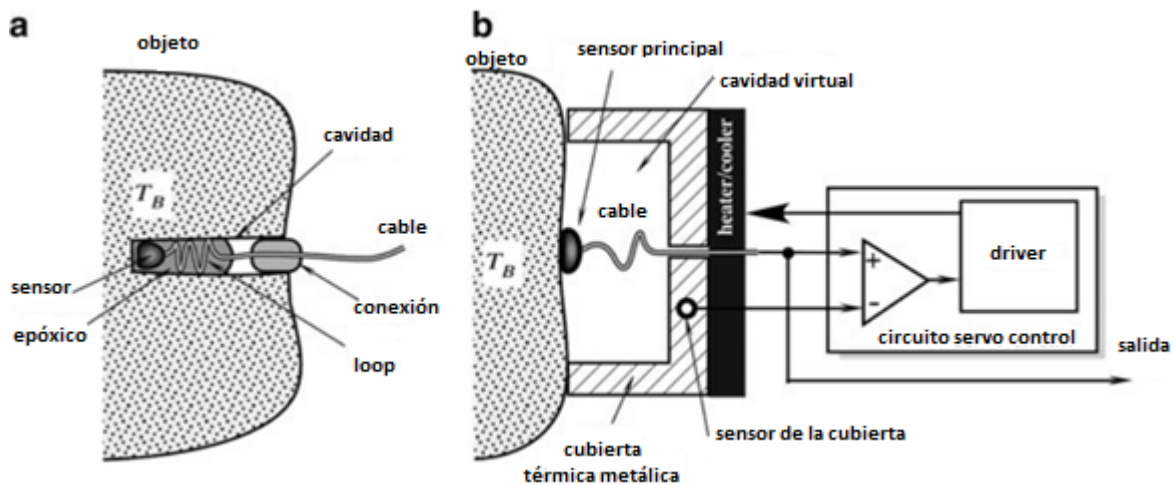
De esta se puede derivar la temperatura del sensor como:

$$T_S = T_B - (T_B - T_0) \frac{r_1}{r_2} = T_B - \Delta T \frac{r_1}{r_2}, \quad (\text{Ecuación 2.37})$$

Donde  $\Delta T$  es el gradiente térmico entre el objeto y los alrededores. Haciendo un análisis más a profundidad a 2.37, podemos obtener algunas conclusiones adicionales. La primera es que el sensor de temperatura  $T_S$  es diferente a la temperatura del objeto. La única excepción es que cuando el ambiente está a la misma temperatura que el objeto (un caso especial cuando  $\Delta T = T_{Bc} - T_0 = 0$ ). La segunda conclusión que  $T_S$  se aproximará a  $T_B$  en lugar del gradiente de temperatura cuando la relación  $r_1/r_2$  se aproxime a cero. Esto significa que para minimizar el error en la medición uno de ellos debe mejorar el acoplamiento térmico entre el objeto y el sensor y desacoplar el sensor de los alrededores como sea posible, sin embargo esto no es fácil de realizar.

La mejor manera de aproximar  $\Delta T$  a cero es incrustar el sensor dentro del objeto como se muestra en la figura 2.22b. Se forma una cavidad en el objeto para que el sensor sea incrustado, preferentemente con alguna grasa térmica o epóxica u otro método de unión con las paredes del sensor y la cavidad del objeto. El cable cerca del sensor forma un bucle y también es colocado dentro de la cavidad. Esto permite la equalización de las temperaturas del sensor, el cable y la cavidad. Como el sensor y la porción del cable no están expuestos a la temperatura externa la medición se vuelve más efectiva.

No siempre es posible crear una cavidad dentro del objeto y solo queda la opción de colocar el sensor sobre la superficie. Este escenario no es el mejor, sin embargo existe una poderosa técnica llamada “cavidad virtual” que se aplica a las mediciones sobre la superficie, forzando que la  $\Delta T$  tienda a cero. En un circuito práctico el sensor principal está provisto de un aislante térmico como se muestra en la figura 2.22.b. La cubierta capacitiva es fabricada de un metal con una muy buena conductividad térmica (por ejemplo el aluminio) y contiene el calentador incluido (y el enfriador) y otro sensor de temperatura en la cubierta térmica.



**Figura 2.22. Sensor de temperatura incrustado (a) sensor de temperatura complementado con una cubierta térmica (b)**

Ambos sensores proveen señales al control del servo-circuito que provee la energía para enfriar/calentar. El servo-circuito tiene como objetivo disminuir el gradiente de temperatura entre el sensor principal y el sensor de la cubierta. Preferentemente la cubierta debe tener contacto con el objeto y ambos protegen al sensor principal de la temperatura del ambiente.

La superficie del objeto y la cubierta forman una cavidad virtual termostática en el lugar de la medición. Cuando el gradiente térmico entre los dos sensores se aproxima a cero el sensor principal se desacopla térmicamente del ambiente. Es muy importante desacoplar térmicamente el sensor principal de la cubierta térmica, de otra manera el circuito se tornará inestable. Este método es usado en los termómetros médicos.

En el análisis anterior es válido solo cuando la condición del sensor es estática, ahora consideraremos el caso dinámico en el que la temperatura cambia con respecto del tiempo. Esto ocurre cuando ambas temperaturas la del objeto y la de

los alrededores cambian o cuando el sensor está recién colocado y su temperatura aun no es estable.

Inicialmente consideraremos un caso ideal bajo las siguientes consideraciones:

- Que la resistencia térmica entre el sensor y el ambiente es infinitamente grande ( $r_2$  tiende a infinito).
- La temperatura del objeto no cambia después de que el sensor es colocado.

En otras palabras el objeto es considerado mucho más grande que el sensor y actúa como una fuente/consumidor de calor “infinita”, es decir que tiene una capacidad térmica infinita y una gran conductividad térmica. En el tiempo  $t=0$ , la temperatura inicial del sensor es  $T_1$  y entra en contacto con la temperatura del objeto que tiene la temperatura  $T_B$ . De acuerdo con la ley de Newton de enfriamiento la cantidad incremental del calor transferido al sensor es proporcional al gradiente de temperatura entre la temperatura del sensor instantánea  $T_S$  en ese instante y la temperatura del objeto  $T_B$ :

$$dQ = \alpha_1 (T_B - T_S) dt \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

Donde  $\alpha_1 = 1/r_1$  es la conductividad térmica en la frontera del sensor y el objeto. Cabe mencionar que  $T_S$  es cambiante. Si el sensor tiene un promedio de capacidad térmica específica  $c$  y una masa  $m$ , el calor recibido por el sensor es:

$$dQ = mcdT \quad (\text{Ecuación 2.39})$$

Las ecuaciones 2.38 y 2.39 son iguales y dan como resultado la ecuación diferencial de primer grado

$$\alpha_1 (T_B - T_S) dt = mcdT, \quad (\text{Ecuación 2.40})$$



Denotamos la constante térmica de tiempo  $\tau_T$  como

$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1} = mcr_1, \quad (\text{Ecuación 2.41})$$

Entonces la ecuación diferencial toma la forma

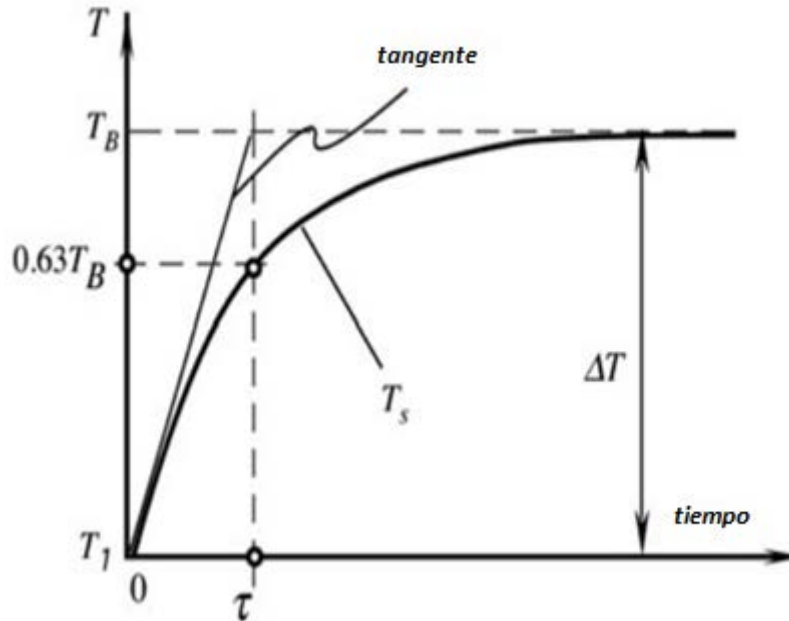
$$\frac{dT}{T_B - T_S} = \frac{dt}{\tau_T}. \quad (\text{Ecuación 2.42})$$

La solución la ecuación es la que sigue

$$T_S = T_B - \Delta T e^{-\frac{t}{\tau_T}}, \quad (\text{Ecuación 2.43})$$

El tiempo transitorio de la temperatura del sensor que corresponde a la solución mostrada, está dibujada en la gráfica de la figura 2.23. La constante de tiempo  $\tau_T$  es igual el tiempo requerido por la temperatura  $T$  para alcanzar aproximadamente el 63.2% del gradiente inicial  $\Delta T = T_B - T_1$ . Entre más pequeña sea la constante del tiempo el sensor responderá más rápidamente a los cambios de temperatura.

La constante de tiempo puede minimizarse reduciendo el tamaño del sensor ( $m$  *pequeña*) y mejorando el acoplamiento con el objeto ( $r_1$  *pequeña*)



**Figura 2.23. Cambios de temperatura del sensor (caso en que el sensor es acoplado idealmente a un objeto ideal)**

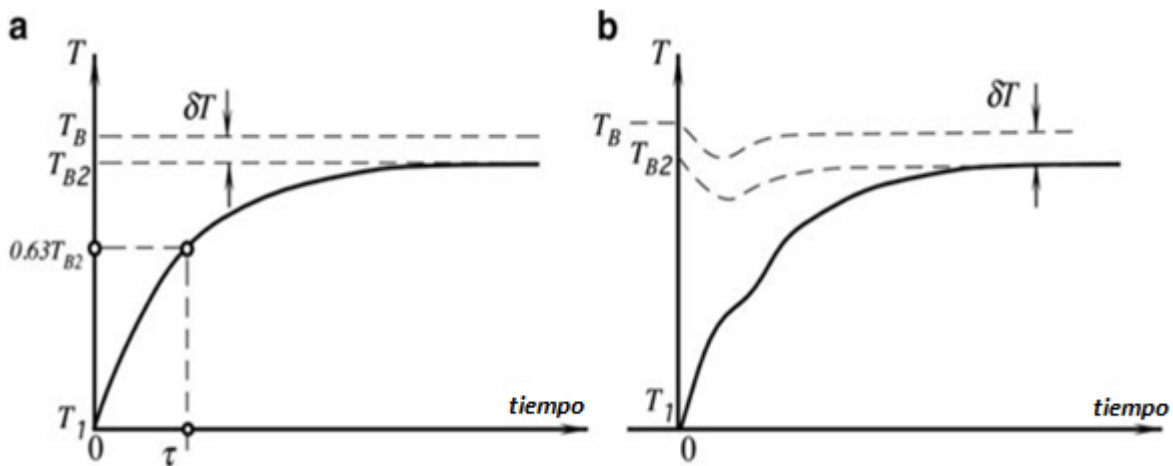
Si esperamos mucho tiempo ( $t \rightarrow \infty$ ) después de haber colocado el sensor, en el estado de (ecuación 2.43) la temperatura del sensor se aproxima a la temperatura del objeto:  $T_S = T_B$  y la lectura del sensor puede ser usada para calcular la temperatura del objeto. Teóricamente toma un tiempo infinito alcanzar el perfecto equilibrio entre  $T_S$  y  $T_B$ , afortunadamente solo se requiere de una precisión finita para la mayoría de los casos prácticos un estado de cuasi-equilibrio puede considerarse entre 5 y 10 veces la constante del tiempo. Por ejemplo después de esperar un tiempo  $t = 5\tau$  la temperatura del sensor diferirá de la del objeto en un 0.07% del gradiente inicial, mientras que si esperamos 10 veces la constante del tiempo, la diferencia estará en el 0.005%

Ahora en un caso más real, vamos a quitar una de las afirmaciones mencionadas y consideraremos que el acoplamiento térmico con el ambiente no es muy grande, esto es  $r_2$  diferente de infinito, entonces la constante de tiempo térmica deberá ser determinada por

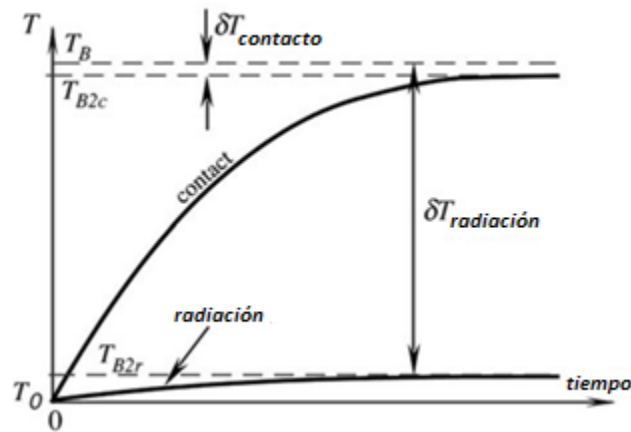
$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1 + \alpha_2} = mc \frac{r_1}{1 + \frac{r_1}{r_2}} \quad (\text{Ecuación 2.44})$$

Y la respuesta del sensor se muestra en la figura 2.24a. Es importante notar que ahora la temperatura del sensor nunca alcanza exactamente la del objeto, sin importar cuanto tiempo pase. Por lo tanto aún en un estado de equilibrio siempre habrá un gradiente de temperatura remanente  $\delta T$ , el cual es el error de medición debido a un deficiente desacoplamiento del ambiente.

Ahora removamos la segunda afirmación, no consideraremos al objeto como una fuente o consumidor de calor. Esto significa que el objeto es mucho más grande que el sensor o su conductividad térmica no es tan alta, como resultado de esta “imperfección” el sensor se perturbará al menos temporalmente la medición. La figura 2.23 muestra que por encima del acoplamiento, la temperatura del objeto en el punto de contacto se desvía y después se estabiliza. Esto causa una desviación en el perfil de temperatura del sensor y que ya no es aplicable la función exponencial ideal y el concepto de una constante de tiempo térmica ( $\tau_T$ ). En la práctica esta desviación llega a ser significativa sí queremos emplear un algoritmo predictivo como se mencionó anteriormente o cuando se necesita un muestro rápido.



**Figura 2.24. Cambios en la temperatura del sensor acoplado con el ambiente (a) y cuando el objeto tiene una conductividad térmica limitada (b)**



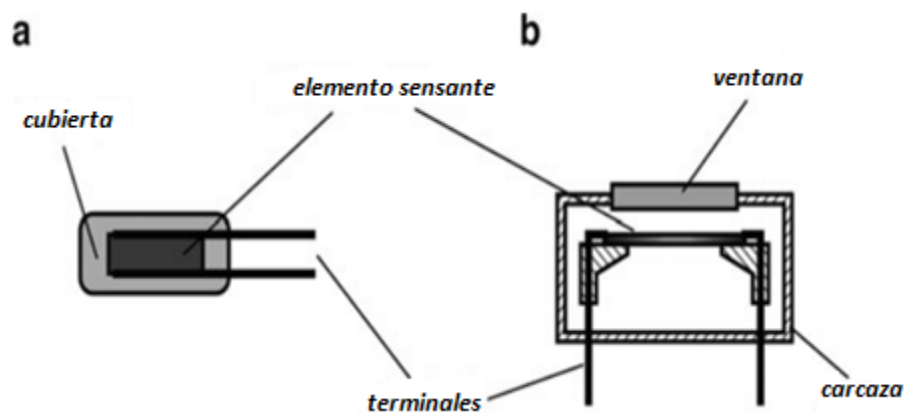
**Figura 2.25. Diferencia en las respuestas térmicas entre sensores de temperatura con y sin contacto**

Los algoritmos predictivos requieren un conocimiento de la función de respuesta dinámica del sensor. El algoritmo resultará con grandes errores si la función real difiere de la pre-programada. Nuevamente, la mejor solución conocida para este problema es usar ambos, un sensor incrustado en el cuerpo del objeto o una cubierta térmica, como se muestra en la figura 2.25

El análisis realizado aplica para todos los sensores de temperatura los de contacto o los basados en radiación, la única diferencia es que para un sensor de contacto típicamente  $r_1 \ll r_2$ , mientras que para un sensor IR sin contacto  $r_1 \gg r_2$ . En otras palabras un sensor típico de contacto se acopla mejor térmicamente con el objeto que con el ambiente, mientras que un sensor IR es todo lo contrario ya que se acopla mucho mejor con el ambiente, esta diferencia se ilustra en la figura 2.24.

Un sensor de contacto consiste en los siguientes componentes (figura 2.26):

1. Un elemento sensante, dispositivo que es capaz de variar sus propiedades eléctricas en respuesta a cambios de temperatura. Un buen elemento sensante debe tener un bajo calor específico, masa pequeña, alta conductividad térmica, y una alta y predecible sensibilidad a la temperatura.
2. Las terminales son cables o almohadillas que conectan al elemento sensante y un circuito electrónico externo. Las terminales deben tener la más baja conductividad térmica y la más baja resistencia eléctrica (el platino es el más adecuado pero es caro). También las terminales frecuentemente son usadas para sostener al elemento sensante así que deben poseer las propiedades mecánicas adecuadas para este propósito.
3. La capa protectora es o bien una carcasa o revestimiento, el cual separa físicamente el elemento sensante del ambiente. Una buena cubierta debe tener muy baja resistencia térmica (alta conductividad térmica) y debe ser un buen aislante eléctrico. También debe ser estable en la convivencia con el medio ambiente e impermeable a la humedad y otros compuestos que puedan contaminar al elemento sensante.



**Figura 2.26. Estructura general de los sensores de temperatura: sensores de contacto (a) y sensores térmicos sin contacto de radiación IR (b)**

Todos los sensores de temperatura pueden dividirse en dos clases: los sensores absolutos y relativos. Un sensor de temperatura absoluto mide la temperatura con referencia al cero absoluto o a cualquier otro punto en la escala absoluta de temperatura, por ejemplo 0°C (273.15°K), 25°C o la temperatura de calibración elegida. Ejemplos de sensores absolutos son los termistores y los detectores de temperatura resistivos (RTDs). Un sensor de temperatura relativo mide la diferencia de temperatura entre dos objetos donde uno de ellos es llamado referencia.

### **2.4.1. Termistores**

El término termistor es una unión entre las palabras térmico y resistor. El nombre es usualmente usado para sensores óxido-metálicos fabricados en forma de gotas, barras, cilindros, láminas rectangulares y películas muy delgadas. Los termistores también pueden ser fabricados de silicón y germanio. Un termistor pertenece a los sensores de temperatura absolutos, estos se dividen en dos grupos: NTC y PTC.

Solo los termistores NTC son usados para mediciones de precisión de temperatura.

#### **2.4.1.1. Termistores NTC**

Un termistor óxido-metal convencional tiene un NTC, esto significa que su resistencia disminuye con el aumento de la temperatura. La resistencia de estos termistores como el de cualquier otro está determinada por sus dimensiones físicas y su resistividad

Cuando se requiere gran precisión o el rango de temperatura operativa es muy amplia las características del termistor no deben tomarse de las especificaciones del fabricante. Las tolerancias típicas de la resistencia nominal están en el rango de:  $\pm 10\%$ . A menos que el termistor haya sido ajustado de fábrica para mejor tolerancia y alcanzar una mayor eficacia en las mediciones el termistor necesita ser calibrado de manera individual en todo el rango de temperatura operacional. Los fabricantes pueden recortar el termistor y ajustarlo a dimensiones que controlan directamente el valor nominal de la resistencia a un rango de temperatura fijo, sin embargo esto significa incrementar el costo. Una alternativa para el usuario final es calibrar los termistores de manera individual. La calibración significa que un termistor tiene que ser ajustado a una temperatura conocida y entonces medir su resistencia. Esto se repite a diferentes temperaturas si se requiere de un punto de calibración. Naturalmente la calibración del termistor es tan buena como la efectividad del termómetro de referencia usado para las mediciones durante la calibración. Para medir la resistencia de un termistor este es agregado a un circuito de medición conectado a corriente eléctrica. Dependiendo de la precisión requerida y las restricciones de los costos de producción, la calibración del termistor puede estar basada en uno o en varias aproximaciones conocidas (modelos) de su respuesta a la temperatura.

Cuando un termistor es usado como sensor de temperatura, se asume que todas sus características están basadas en la llamada resistencia de potencia cero (*zero-power resistance*), que significa que la corriente que pasa a través del termistor no resulta en un incremento significativo de temperatura (auto-calentamiento) que pueda afectar la precisión de la medición.

## **2.4.2. Termostatos**

### **2.4.2.1. Termostatos electromecánicos**

Típicamente usan interruptores de mercurio para el control de la temperatura. Un termostato común de una sola etapa enfriamiento/calentamiento tendrá un par de estos interruptores, uno para cada etapa. Si se tiene un termostato que puede usarse para calentamiento o enfriamiento se debe procurar permitir solo un modo de operación a la vez y prohibir llamadas del modo opuesto, o se debe tener una zona neutral en donde no se realicen peticiones de calentamiento o de enfriamiento por el termostato, esta zona neutral no debe ser más pequeña que dos grados.

### **2.4.2.2. Termostatos electrónicos**

Son aquellos que sensan la temperatura de manera electrónica, vía un termistor (también tienen capacidades de sensar remotamente). Las etapas de salida no son controladas por bulbos de mercurio o por interruptores electromecánicos, sino por interruptores o relevadores montados en un circuito electrónico dentro del termostato.

### **2.4.2.3. Termostatos programables**

Son aquellos que tienen una función de cronometrado interna. El hecho de que un termostato sea electrónico no significa que sea programable. Los termostatos programables permiten establecer modos de ocupación, desocupación y puntos de ajuste. En el modo ocupado los puntos de ajuste del calentamiento y el enfriamiento son ajustados en niveles de confort, por ejemplo el compresor de un refrigerador funciona continuamente o de manera intermitente dependiendo del modo seleccionado.



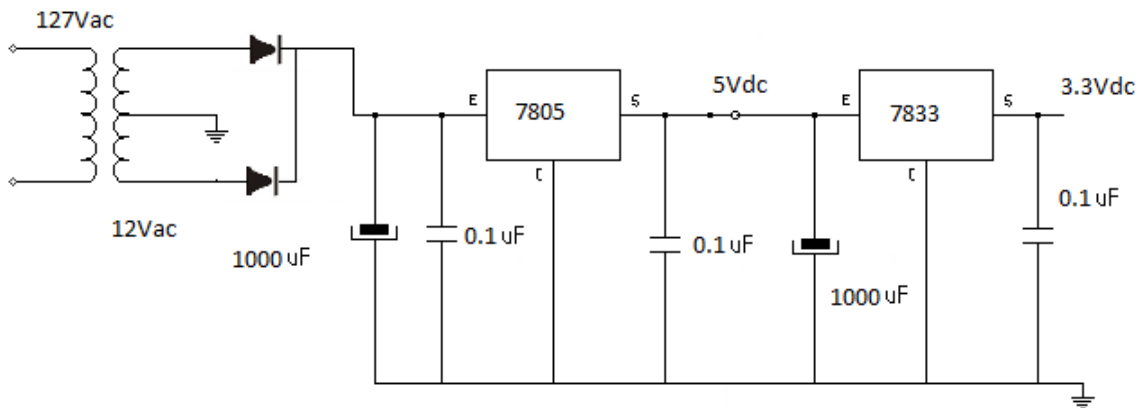
## CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño del prototipo se basa en el manejo de los siguientes bloques funcionales que a continuación se explican.

### 3.1. Fuente de alimentación regulada

Debido a que un refrigerador opera a  $127\text{ V}_{AC}$  y nuestro circuito de control se alimenta de  $5\text{V}_{DC}$  y  $3.3\text{ V}_{DC}$ , tendremos que implementar una fuente regulada para obtener estas tensiones de alimentación ya que de lo contrario nuestro circuito de control se quemaría.

El diagrama de la fuente es el siguiente, ver figura 3.1.



**Figura 3.1. Diagrama de la fuente**

Debido a que no podemos bajar directamente de  $127\text{ V}_{AC}$  a  $5\text{V}_{DC}$  y  $3.3\text{V}_{DC}$ , lo haremos de modo gradual de la siguiente manera: Lo haremos a través de un transformador y dos reguladores integrados el Lm7805 y el Lm7833.

El transformador será de  $127V_{AC}$  a  $12V_{AC}$ , este lo usaremos para alimentar nuestro primer regulador integrado que es el Lm7805, a través de un puente rectificador de onda completa que nos servirá para convertir de AC a DC ya que la familia de reguladores Lm78XX trabajan con tensiones menores de  $127V_{AC}$  como se muestra en la siguiente tabla:

Regulador integrado	Tensión de salida	Tensión mínima de entrada	Tensión máxima de entrada
7805	+5V	7V	25V
7806	+6V	8V	25V
7808	+8V	10.5V	25V
7885	+8.5V	10.5V	25V
7833	+3.3V	2V	5V
7812	+12V	14.5V	30V
7815	+15V	17.5V	30V
7818	+18V	21V	33V
7824	+24V	27V	38V

**Tabla 3.1. Familia de reguladores 78XX**

- Corriente de salida máxima de 1.5 A
- Potencia máxima de disipación de 15 W
- Polaridad positiva(negativo a tierra)
- Limitación de corriente de circuito corto
- Protección contra sobrecarga térmica

Ya una vez bajada la tensión a  $5 V_{DC}$ , alimentaremos nuestro siguiente integrado el Lm7833 que trabaja a  $5 V$  y nos reduce la tensión de  $5 V$  a  $3.3 V$ , con las tensiones reducidas  $f_s$  a  $5 V$  y  $3.3 V$  alimentaremos nuestro circuito de control.

### 3.2. Sensado de tensión

Para llevar a cabo la regulación de la tensión en el compresor es necesario sensar con ayuda del microcontrolador la tensión de línea y enviar la señal que energizan los relevadores que activen los taps del autotransformador para corregir las tensiones altas y bajas.

Con ayuda del circuito que se muestra en la figura 3.2. se realiza el sensado de la tensión de línea. La señal de alterna pasa a través del diodo D1 y se obtiene una señal rectificada de media onda que se inyecta a la base del transistor Q1, que tiene una función de detector de cruce por cero, generando una forma de onda cuadrada en el punto C como se muestra en la figura 3.3.

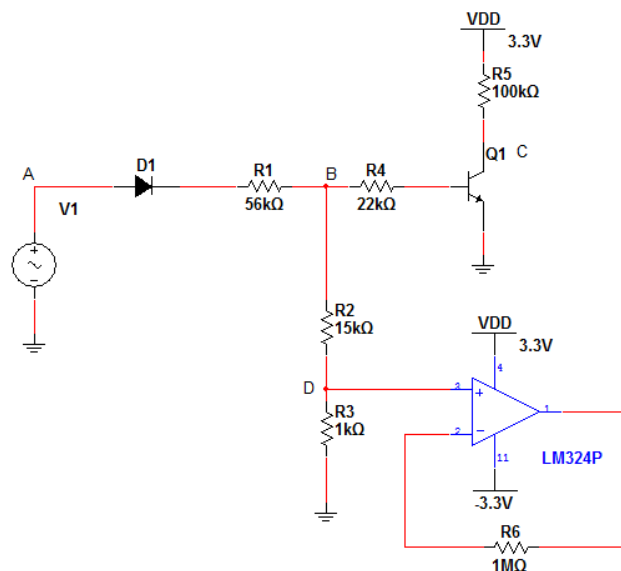
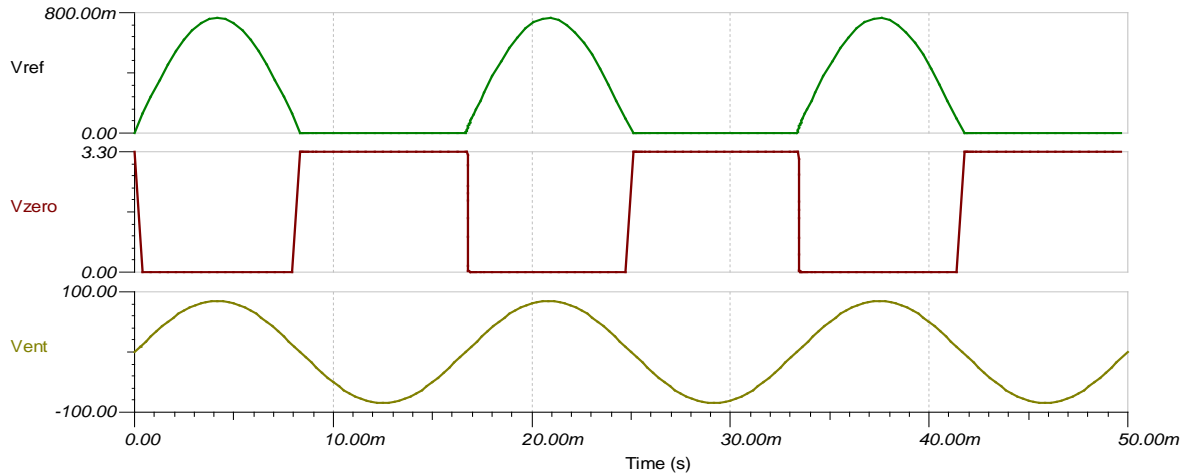


Figura 3.2. Circuito acondicionador de la tensión de línea



**Figura 3.3. Forma de onda del detector de cruce por cero en el punto C.**

Esta señal cuadrada le sirve al microcontrolador como indicador para calcular el tiempo que se requiere dejar pasar para tomar la lectura del valor pico. La frecuencia de la tensión de línea es de 60 Hz, esto quiere decir que el periodo de la señal senoidal es de:

$$T = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16.6667 \text{ ms} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

La tensión máxima se encuentra en un tiempo de  $T/4$ , que es aproximadamente 4.15 segundos. El microcontrolador dejara pasar ese tiempo para poder tomar la lectura que se requiere.

La tensión RMS (*Root Mean Square*, raíz media cuadrática, es el valor de la tensión en alterna que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente en directa) de una señal de media onda se determina calculando el área bajo la curva durante un ciclo completo:

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_p \sin^2 \theta \, d\theta$$

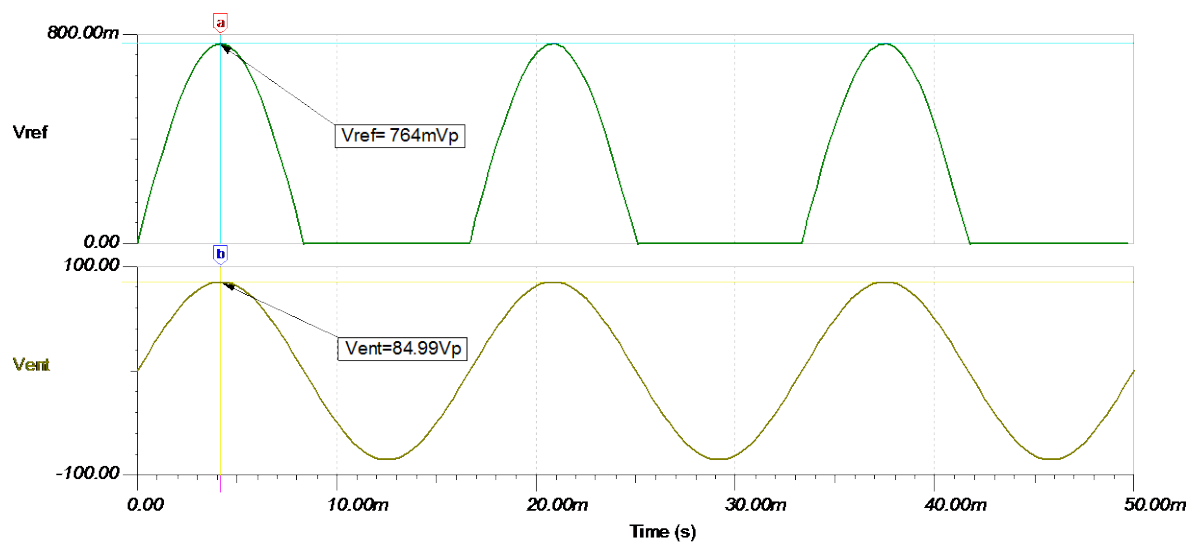
$$V_{RMS}^2 = \frac{V_p^2}{2\pi} [-\cos\theta]_0^\pi$$

$$V_{RMS}^2 = \frac{V_p^2}{2\pi} [-\cos\pi + \cos 0]$$

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

El amplificador operacional LM324 adquiere una señal rectificada atenuada como se muestra en la figura 3.4., en la cual el microcontrolador toma la lectura del valor pico y con ayuda de la ecuación 1 calcula la tensión RMS. Con esto el microcontrolador sensa las variaciones en la tensión de línea. La atenuación de la tensión está dada por:

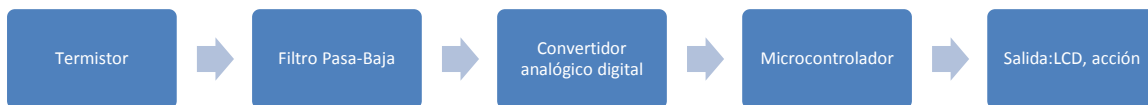
$$A_v = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$



**Figura 3.4. Tensión a la entrada del LM324**

### 3.3. Medición de temperatura basada en microcontroladores.

Nuestro termistor nos dará una salida análoga de tensión, y esta puede ser mostrada con un dispositivo de medición análogo como un voltímetro. Sin embargo nuestro sistema necesita una salida digital.

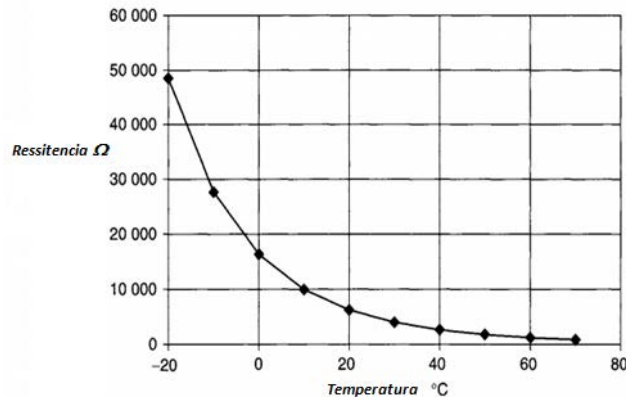


**Figura 3.5. Proceso de medición de temperatura basado en microcontroladores**

En la figura 3.5 se muestra cómo se puede medir la temperatura con un microcontrolador. La temperatura es sensada por el termistor y se produce una tensión la cual es proporcional a la temperatura medida. Esta tensión es filtrada usando un Filtro Pasa-Baja para quitar cualquier ruido de alta frecuencia. La salida del filtro es convertida a digital por un convertidor A/D. La tensión digitalizada es leída por el microcontrolador y se calcula la resistencia del termistor. Después de esta medición de la temperatura puede ser calculada con base en la Tabla 3.2. Finalmente la temperatura es desplegada en un pantalla digital y se toman acciones con las lecturas, para nuestro caso controlará un dispositivo de enfriamiento.

Para nuestro circuito se usará, para el sensado de temperatura un termistor NTC B57020 del fabricante EPCOS. Las características de este dispositivo son las ideales para la medición y control. Su comportamiento será: la resistencia eléctrica disminuirá cuando la temperatura aumente. En general la relación temperatura-resistencia no es lineal, para nuestro proyecto usaremos temperaturas que están

en el rango de  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la relación típica de este comportamiento se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6. Comportamiento típico de la relación R/T**

Las principales ventajas del termistor NTC que es ocupado en nuestro proyecto son:

- Sensibilidad, los cambios de resistencia son relativamente grandes con respecto de la temperatura, típicamente  $-5\%$  por  $^{\circ}\text{C}$ .
- Tamaño ideal, este termistor es muy pequeño y su respuesta a los cambios de temperatura es muy rápida.
- Robusto, este termistor puede soportar impactos mecánicos y térmicos, vibraciones mejor que otros tipos de sensores.
- Medición remota, puede ser usado para censar temperatura en ubicaciones lejanas a través de cables largos, esto es posible porque la resistencia en un cable muy largo es insignificante comparada con la resistencia del termistor.
- Costo, nuestro termistor es más barato que cualquier otro tipo de sensor de temperatura.
- Intercambiable, como nuestro termistor es fabricado con tolerancias muy pequeñas, es posible intercambiar el termistor sin tener que recalibrar todo nuestro sistema.

De los valores que nos proporciona el fabricante procederemos al cálculo de la resistencia en el rango de -3 °C a 3 °C, con intervalos de 1 °C.

Para realizar los cálculos utilizaremos la fórmula de temperatura-resistencia, de las especificaciones que el fabricante nos proporciona obtenemos los valores de constante de temperatura y la resistencia a 25°C, con esto calcularemos la resistencia a cualquier otra temperatura:

$$R_T = R_{25} \exp\left(\frac{\beta}{T_T} - \frac{\beta}{T_{25}}\right) \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde  $R_{25}$  es la resistencia a 25 °C,  $T_{25}$  es la temperatura en grados Celsius a 25 °C, y  $\beta$  es la constante de temperatura de nuestro termistor.

De la hoja del fabricante obtenemos los valores  $R_{25}$ , y  $B_{25/100}$  necesarios para realizar los cálculos y obtener la gráfica de temperatura contra resistencia en el rango que necesitamos para el prototipo.

$$R_{25}=5000 \Omega$$

$$B_{25/100}=3980 \text{ K}$$

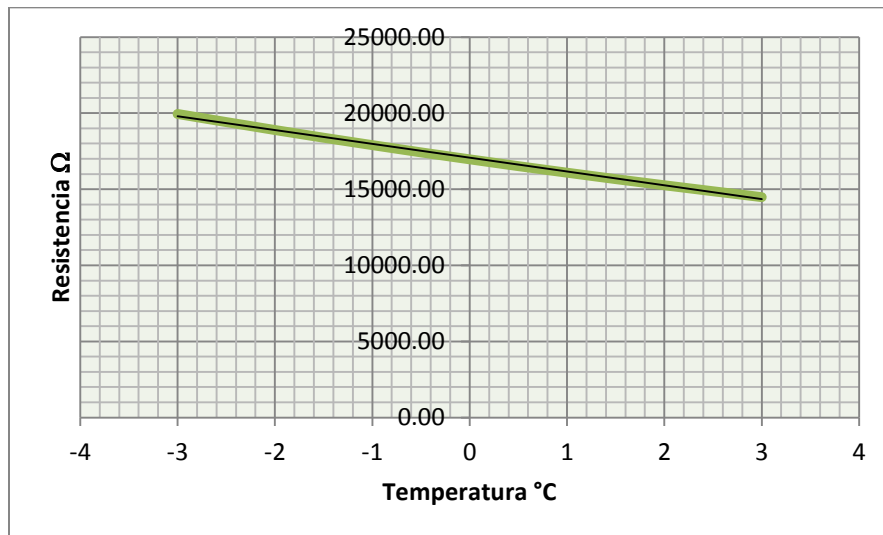
Sustituyendo los datos tenemos los resultados que se muestran en la Tabla 3.2.

Temperatura °C	RT Ω
-3	19945.60
-2	18890.80
-1	17898.92
0	16965.83
1	16087.66
2	15260.84
3	14482.04

**Tabla 3.2. Comportamiento temperatura-resistencia**

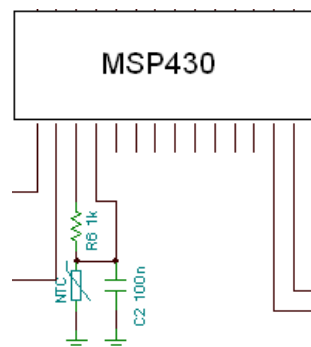


En la siguiente gráfica confirmamos el comportamiento de nuestro termistor, cuando la temperatura aumenta la resistencia disminuye, en esta misma gráfica pareciera que el comportamiento es lineal, sin embargo solo es una pequeña porción del comportamiento total. Ver figura 3.7.



**Figura 3.7. Comportamiento temperatura-resistencia en el termistor NTC**

Con estos datos, es posible ya realizar los cálculos de temperatura en nuestro circuito.



**Figura 3.9. Ejemplo de diagrama circuito sensor de temperatura con microprocesador.**

El siguiente PDL (*Program Description Language*) describe la operación del circuito:

```
COMIENZO
  Inicilizar el LCD
  Inicializar el microcontrolador
  DO FOREVER
    LEER el voltaje del termistor y convertirlo en digital
    Calcula la resistencia del termistor.
    Calcula la temperatura del termistor.
    Muestra la temperatura del termistor en el display
  IF La resistencia del termistor es > 19945.60 o < 14482.04
    ELSE Despliega: "Fuera de rango"
    IF La resistencia del termistor es >14482.04 y <
      19945.60
      ELSE Despliega: "Temperatura OK"
  ENDDO
FIN
```

### 3.4. Comunicación entre el microcontrolador y el LCD

Las pantallas de cristal líquido LCD o *display* LCD para mensajes (*Liquid Cristal Display*) tienen la capacidad de mostrar cualquier carácter alfanumérico, permitiendo representar la información que genera cualquier equipo electrónico de una forma fácil y económica.

En el prototipo diseñado se utilizan las pantallas LCD para desplegar los valores numéricos de temperatura, así como alertas notificando que ésta se encuentra fuera de rango.

La pantalla consta de una matriz de caracteres (normalmente de 5x7 o 5x8 puntos) distribuidos en una, dos, tres o cuatro líneas de 16 hasta 40 caracteres cada línea.

El proceso de visualización es gobernado por un controlador incorporado a la pantalla, el cual se encarga de gestionar el display de cristal líquido: polarizar los puntos de la pantalla, generar los caracteres, desplazar la pantalla, mostrar el cursor, etc., a través de una serie de comandos o instrucciones de alto nivel que permitirán mostrar mensajes o animaciones sobre la pantalla, para realizar esta comunicación se dispone de una interfaz paralelo al exterior de fácil conexión a otros microcontroladores o microprocesadores.

Un dispositivo LCD dispone de dos tipos de memorias ambas independientes. Estas memorias se denominan DD RAM y CG RAM.

La zona de memoria RAM llamada DDRAM (Data Display RAM) donde se almacenan los caracteres que se van a mostrar en la pantalla tiene una capacidad de 80 bytes, 40 por cada línea, de los cuales sólo 32 se pueden visualizar a la vez (16 bytes por línea).

De las 80 posibles, las dos direcciones más importantes de la DDRAM son:

- Dirección 00h, que es el comienzo de la primera línea
- Dirección 40h, que el comienzo de la segunda línea

El LCD dispone de una zona de memoria interna no volátil llamada CGROM donde se almacena una tabla con los 192 caracteres que pueden ser visualizados.

Cada uno de los caracteres tiene su representación binaria de 8 bits. Para visualizar un carácter debe recibir por el bus de datos el código correspondiente, y se muestra en la figura 3.9 la tabla de los códigos para cada signo.

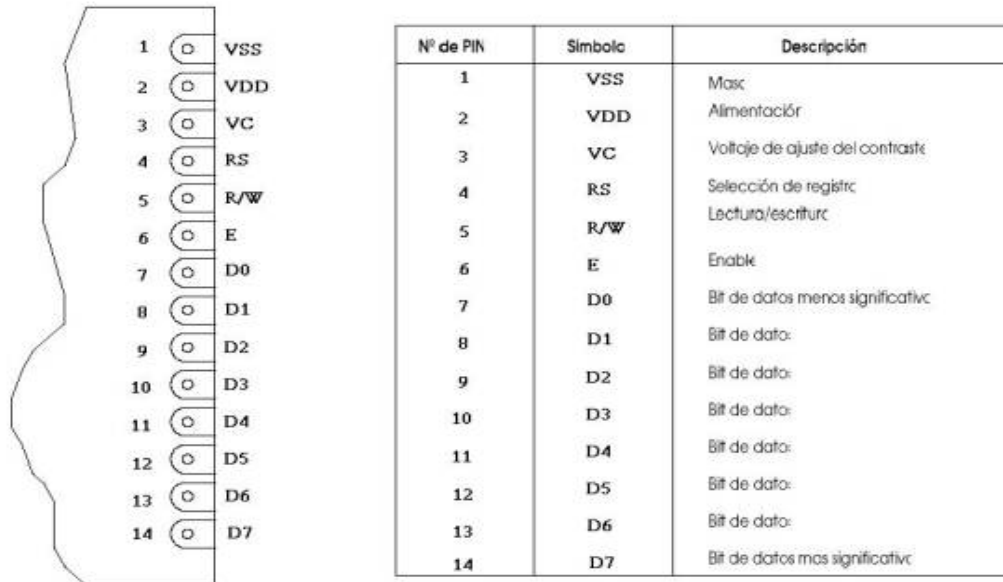
		4 higher bits in address																	
		0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111		
4 lower bits in address	xxxx0000	CG RAM (1)			0	Q	P	`	P					-	タ	ミ	α	p	
	xxxx0001	(2)		!	1	A	Q	a	q					。	ア	チ	△	ä	q
	xxxx0010	(3)		"	Z	B	R	b	r					「	イ	ツ	×	β	θ
	xxxx0011	(4)		#	3	C	S	c	s					」	ウ	テ	ε	ε	°
	xxxx0100	(5)		\$	4	D	T	d	t					、	エ	ト	フ	μ	Ω
	xxxx0101	(6)		%	5	E	U	e	u					・	オ	ナ	1	ε	Ü
	xxxx0110	(7)		&	6	F	V	f	v					ヲ	カ	ニ	ヨ	ρ	Σ
	xxxx0111	(8)		'	7	G	W	g	w					ア	キ	ヌ	ラ	g	π
	xxxx1000	(1)		<	8	H	X	h	x					イ	ク	ネ	リ	フ	×
	xxxx1001	(2)		>	9	I	Y	i	y					ウ	ケ	ル	リ	フ	γ
	xxxx1010	(3)		*	:	J	Z	j	z					エ	コ	ン	レ	j	≠
	xxxx1011	(4)		+	;	K	[	k	[					オ	サ	ヒ	ロ	*	万
	xxxx1100	(5)		,	<	L	¥	l	l					カ	シ	フ	ワ	≠	円
	xxxx1101	(6)		-	=	M	]	m	]					ユ	ズ	ヘ	ン	も	÷
	xxxx1110	(7)		.	>	N	^	n	→					ヨ	セ	ホ	ッ	ñ	
	xxxx1111	(8)		/	?	O	_	o	←					ッ	ツ	マ	°	ö	■

Figura 3.9. Tabla con caracteres normales en LCD.

Carácter definido por el usuario	Valores a almacenar en la CG RAM	
	BINARIO	HEXADECIMAL
■ ■ ■	01110	\$0B
■ ■ ■	01110	\$0B
■ ■ ■	01110	\$0B
■	00100	\$04
■ ■ ■ ■ ■	11111	\$1F
■	00100	\$04
■ ■ ■	01010	\$0A
■ ■ ■	10001	\$11

Figura 3.10. Matriz de LCD correspondiente a carácter definido por el usuario y su codificación en binario

A continuación en la figura 3.11 podemos ver la asignación de pines en una pantalla LCD .



**Figura 3.11. Asignación de pines en una pantalla LCD**

Los pines 1 y 2, son los utilizados para la alimentación del módulo LCD. La tensión utilizada es de 5 volts.

El pin 3 se utiliza para ajustar el contraste de la pantalla LCD. Por medio de un potenciómetro regularémos la intensidad de los caracteres, a mayor tensión mayor intensidad, que regulará la misma tensión que se utiliza para la alimentación.

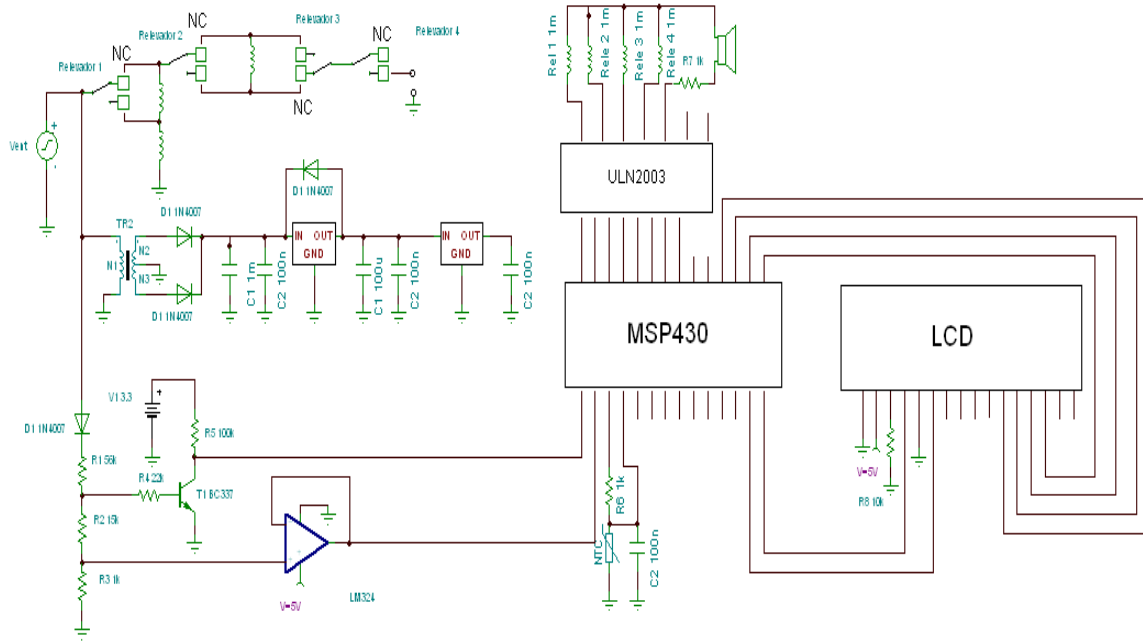
El pin 4 se utiliza para indicar al bus de datos si la información que le llega es una instrucción o por el contrario es un carácter. Si RS=0 indicará que en el bus de datos hay presente una instrucción, y si RD=1, que tiene un caracter alfanumérico.

El pin 5 es el de escritura o lectura. Si está a 0 el módulo escribe en pantalla el dato que haya en el bus de datos, y si está a 1 se leerá lo que hay en el bus de datos.



### 3.5. Diseño final del prototipo

Basado en los bloques funcionales explicados en este capítulo el diseño final del prototipo se muestra en la figura 3.13.



**Figura 3.13. Esquemático del dispositivo**

El diseño mostrado en la figura 3.13 se explicara a detalle en el siguiente capítulo.

## **CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

### **4.1. Especificaciones del diseño**

Este proyecto está compuesto de dos dispositivos fundamentales: un termostato electrónico y un regulador. El diseño se logró construyendo por separado los dos dispositivos mencionados. Comprendiendo y reproduciendo su funcionamiento se llegó al siguiente esquemático. Ver figura 3.13.

Se analizó el funcionamiento de un regulador comercial y de un termostato electrónico. Derivado de esto se logró extrapolar a un diseño de los dos dispositivos basados ambos en un microcontrolador.

El siguiente capítulo describirá el funcionamiento de cada uno de los dispositivos de manera individual.

Por último se agregan características adicionales basadas en software para lograr que el prototipo funcione como un protector para el sistema de refrigeración y para el compresor.

### **4.2. Regulador de tensión**

Este dispositivo permite regular la tensión proveniente de la línea de alimentación hacia la salida de éste, ya sea compensándola o reduciéndola cuando ésta se encuentra fuera de los rangos de operación establecidos como puntos de tensión aceptables.

Los rangos de operación nominales de los dispositivos que se conectan a la red eléctrica de  $127V_{AC}$  usados en la industria de la refrigeración comerciales (reguladores y compresores) están generalmente en un rango de operación de



$\pm 10\%$ . Sin embargo existen algunos tipos de reguladores de tensión, de propósito específico y se usan de acuerdo con el dispositivo eléctrico al que esté dirigido.

El rango de operación de este regulador está especificado para operar en valores de tensión que van de 70  $V_{AC}$  hasta 150  $V_{AC}$ , obteniendo como salida regulada una tensión de 91  $V_{AC}$  135  $V_{AC}$ . Estos parámetros de tensión permiten que la regulación sea adecuada hasta en lugares con variaciones extremas de tensión.

La tabla siguiente muestra el funcionamiento del regulador, mostrando el comportamiento de la tensión de entrada contra tensión de salida. Ver Tabla 4.1.

<b>V<sub>ENTRADA</sub> (Vac)</b>	<b>V<sub>SALIDA</sub> (Vac)</b>
70	91
75	97.5
80	104
85	110.5
90	117
95	112.1
100	118
105	123.9
110	110
115	115
120	120
125	125
130	130
135	118.8
140	123.2
145	127.6
150	132
155	136.4

**Tabla 4.1. Funcionamiento del regulador de tensión**

En un rango de tensión de 0 a 80  $V_{AC}$  el regulador no va entrar en operación ya que se requiere de una tensión mínima de arranque, en este caso aunque la tensión de corte por límite inferior está especificado a los 70  $V_{AC}$ , debido que este punto cuenta con una histéresis de 10  $V_{AC}$ . Es necesario que el punto donde inicia la operación del temporizador del compresor sea cuando la tensión de entrada del regulador esté por arriba de los 80  $V_{AC}$  con la finalidad de asegurar que el arranque del compresor sea muy por encima de la tensión de arranque mínima.

#### 4.2.1. Circuito detector de media onda, detección de tensión a través del ciclo positivo de la señal de AC

A través del arreglo comprendido por la siguiente figura se obtiene la proporción de la señal de entrada al sistema en el punto máximo de tensión. Ver figura 4.1.

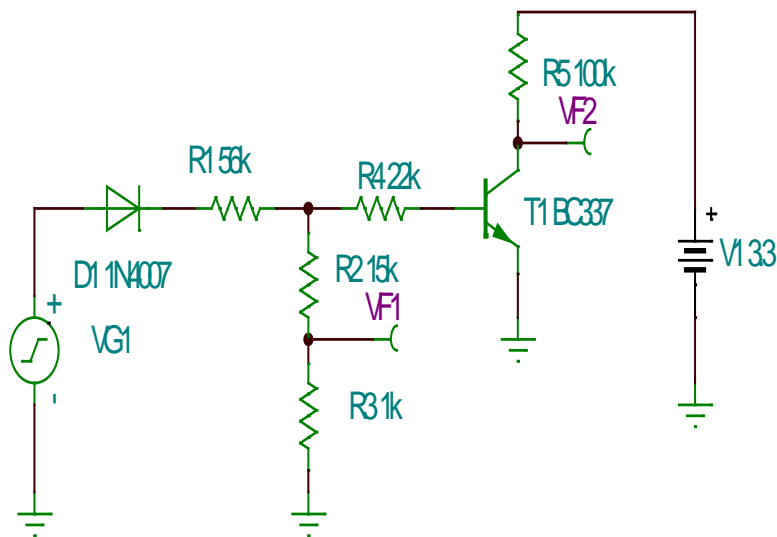
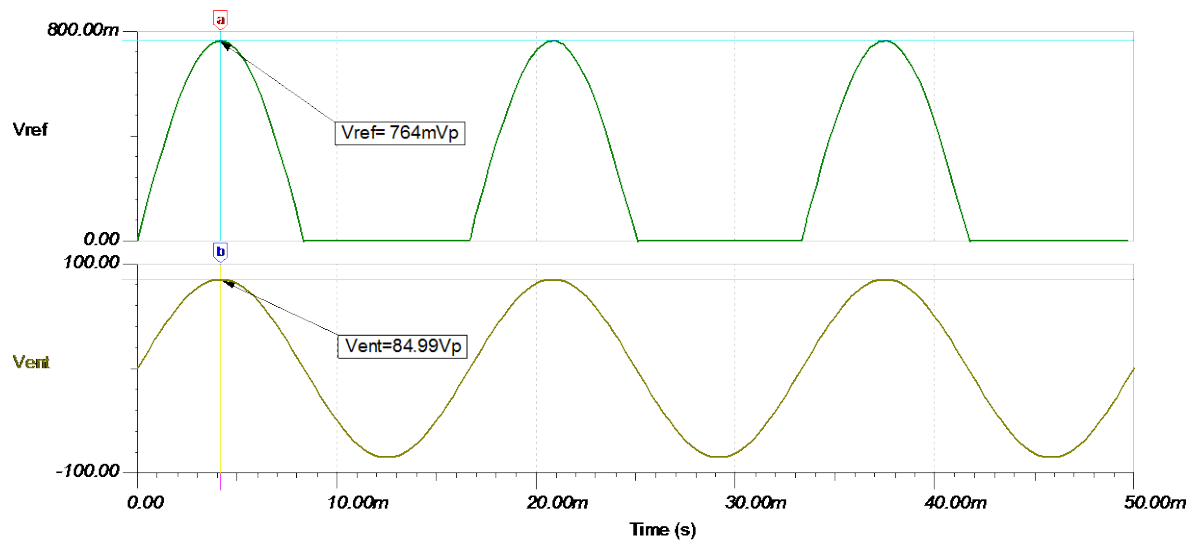


Figura 4.1. Circuito detector de media onda

Este circuito es utilizado para rectificar la señal de alterna, proporcionado solamente la parte positiva de la tensión.

A través de las resistencias R1, R2, R3 se atenúa la señal, de tal manera que del divisor conformado entre la resistencia R2 y R3, se obtiene la siguiente señal. Ver figura 4.2.



**Figura 4.2. Forma de onda recortada y atenuada**

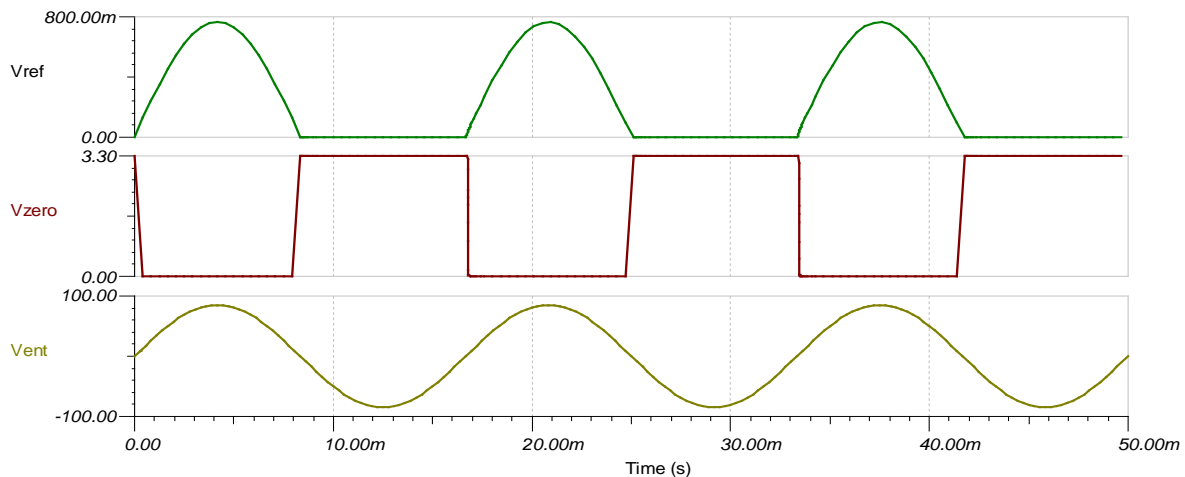
La figura 4.2 muestra la señal recortada y atenuada por el arreglo ( $V_{REF}$ ), en la parte de abajo de la señal se muestra la señal de alterna con un valor de 170 Vpp equivalente a un valor RMS de 120 V<sub>AC</sub> ( $V_{ENTRADA}$ ).

A través de la detección del cruce por cero se determina la tensión máxima de la señal rectificadas. La figura 4.2 muestra que para una tensión pico de 84Vp se tiene una tensión pico de 764 mVp. Este valor es leído por el convertidor analógico digital del microcontrolador (ADC), el cual es interpretado por el programa para determinar la tensión de entrada del sistema.

Para que el ADC lea el valor requerido de la señal es necesario realizarlo en el valor máximo de la señal, por tal motivo se realiza esta operación detectando el cruce por cero, mediante el circuito de la figura 4.1, se tiene que el transistor empieza a conmutar debido a que la resistencia R4 excita la base de transistor saturándolo cada vez que la señal rectificada sobrepasa la tensión requerida para activar el transistor.

La acción de saturación y corte del transistor sirve de referencia para que el microcontrolador detecte cuando se realice el cruce por cero, y a partir de ese instante el microcontrolador toma la decisión de hacer la lectura después de 4.16 ms que es el momento en el que coincide el pico de la señal. Esto se ejemplifica en la figura 4.3.

Cabe aclarar que el microcontrolador decide tomar la lectura si se cumple la condición de que la tensión sea mayor a un determinado valor, ya que no en todos los casos la señal a medir coincide con la parte positiva de la señal.



**Figura 4.3. Detección de cruce por cero**

#### 4.2.1.1. Sensado de tensión

Un punto importante al momento de medir la línea de alimentación, es que no es necesario tener mediciones de exactitud, ya que en la industria de la refrigeración los puntos de calibración son establecidos por el diseñador y se permite un rango de error de  $\pm 1 V_{AC}$ , sin afectar el funcionamiento del sistema.

Esto permite utilizar una técnica para medir la tensión de línea. Para el control no es necesario obtener una tensión RMS o una tensión como lo realiza un multímetro. En este caso la propuesta para medir la tensión de la línea de alimentación es obtener una proporción de la tensión máxima registrada en la cresta de la línea rectificadora en un tiempo determinado.

Esta propuesta no es más que una solución para reducir el costo del circuito rectificador con filtro para obtener la proporción de tensión hacia el control. Este es un método para monitorizar solo la tensión pico de la línea de alimentación y tiene una rapidez de respuesta superior a la obtenida en un arreglo RC, ya que dependiendo de la configuración que se proponga, existe un punto en el cual la relación rizo y tensión se pierde entre bajas y altas tensiones.

Por tal motivo para evitar errores por tolerancia en los dispositivos, y además de eliminar un elemento, se utiliza un arreglo de un diodo rectificador y un par de resistencias de precisión.

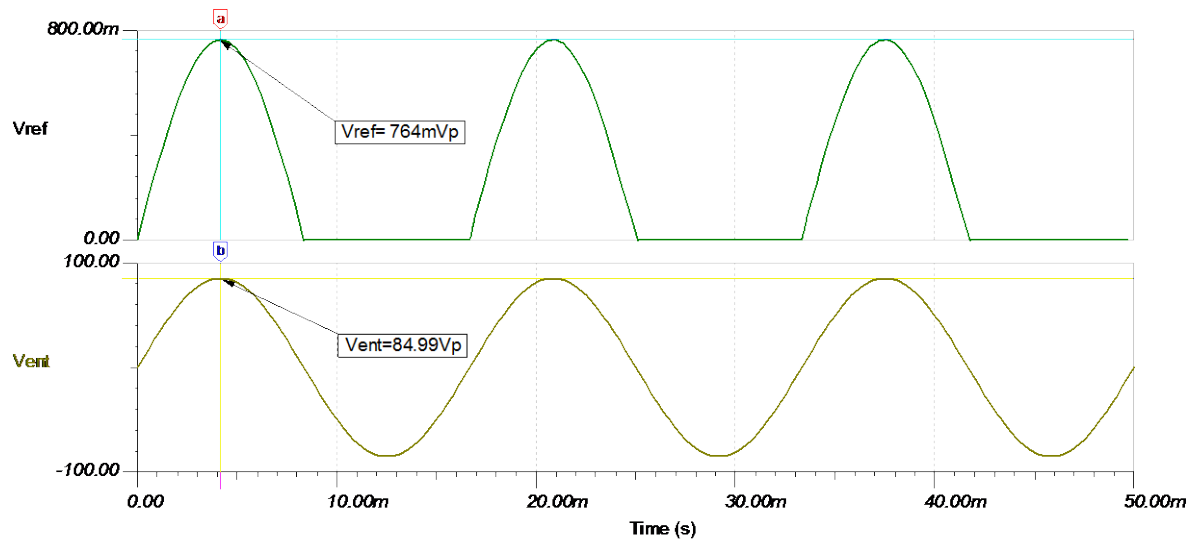
Experimentalmente se obtienen los valores de la relación  $V_{AC}$  de *entrada vs conversión* del convertidor analógico digital, los cuales se despliegan en la Tabla 4.2.

$V_{ent}$ ( $V_{AC}$ )	Bit (ADC)
70	284
75	308
80	325
85	345
90	365
95	387
100	410
105	429
110	450
115	468
120	491
125	511
130	530
135	553
140	574
145	593
150	614
155	634

**Tabla 4.2. Relación  $V_{AC}$  de entrada vs conversión ADC**

#### **4.2.2. Programación para detectar la señal de tensión de alterna**

El cruce por cero es utilizado para que a partir de ese instante se realice un retardo de 4.16 ms, con la finalidad de determinar el punto máximo de la señal, mostrado en la figura 4.4.



**Figura 4.4. Valor pico máximo.**

El siguiente código muestra la manera en que se obtiene el valor numérico del ADC que será utilizado para realizar las comparaciones de los puntos de activación y desactivación de los relevadores. Este es utilizado para determinar el punto máximo de tensión de la señal proveniente del arreglo del circuito utilizado para atenuar la señal.

Las instrucciones necesarias para la detección en el cruce por cero de la señal de entrada de alimentación del sistema se muestran en el apéndice B

El código es utilizado para realizar las comparaciones en donde el regulador hace la selección de los taps del transformador para realizar la compensación de la tensión de entrada del prototipo. Se muestra en el apéndice C

### 4.2.3. Determinación de los valores de operación

Los valores de operación se han determinado con el objetivo de que cualquier dispositivo logre operar aun cuando las variaciones de tensión en la entrada sean considerablemente grandes, esto se logra reduciendo este rango de valores a uno mucho menor.

Por tal motivo los valores se han determinado de la siguiente manera, para aprovechar los devanados del transformador realizando las conexiones de sus devanados para compensar la tensión un 30%, 18 % y reducir la tensión un 12%, pasando por una relación 1:1 entre la entrada y la salida. A continuación se muestran los puntos de operación de tensión de entrada y salida del regulador. Ver Tabla 4.3.

	$V_{ENT} (V_{AC})$	$V_{SALIDA} (V_{AC})$	Porcentaje
<b>Límite Inferior</b>	70	91	30%
	75	97.5	30%
<b>Recuperación L.I.</b>	80	104	30%
	85	110.5	30%
<b>Primer Cambio</b>	90	117	30%
	95	112.1	18%
	100	118	18%
	105	123.9	18%
<b>Segundo Cambio</b>	110	110	0%
	115	115	0%
	120	120	0%
	125	125	0%
<b>Tercer Cambio</b>	130	130	0%
	135	118.8	-12%
	140	123.2	-12%
	145	127.6	-12%
<b>Recuperación L.S.</b>	150	132	-12%
<b>Límite superior</b>	155	136.4	-12%

**Tabla 4.3. Puntos de operación del regulador**



En la Tabla 4.3 se muestra el comportamiento del regulador de acuerdo con las variaciones de tensión de la entrada, la cual también tiene los puntos de cambio, recuperación y límites superior e inferior.

De acuerdo con las combinaciones entre la activación y desactivación de los relevadores, se seleccionan los devanados del transformador permitiendo tener las salidas mostradas.

#### **4.2.3.1. Límites y sus recuperaciones**

Estos puntos se han determinado de tal manera que protegen la carga una vez que las variaciones de tensión superan los puntos seguros de operación. Cuando la tensión de entrada del regulador está fuera del rango establecido como un valor seguro, el regulador interrumpe la corriente hacia la carga para desconectarla. Esto ayuda a que no se dañe el dispositivo conectado al regulador.

Existen límites de operación que permiten que el regulador proporcione corriente hacia la carga, pero una vez que la tensión de entrada se encuentra fuera de estos valores, la salida del regulador se interrumpe. Hasta que no se tenga una tensión de entrada dentro de los límites de operación pero contando con una ventana de histéresis, el regulador vuelve a operar.

#### **4.2.3.2. Primero, segundo y tercer cambio con ventana de tensión de histéresis**

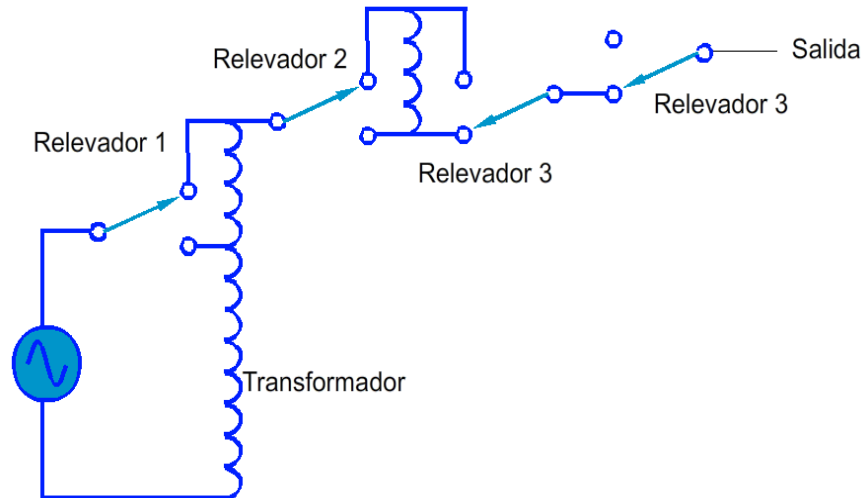
La manera de hacer que el regulador tenga un rango de operación más amplio que los que se comercializa comúnmente, es permitiendo que el regulador elija los devanados del transformador, permitiendo así varias combinaciones de elevación y reducción.

Cada vez que el regulador toma la decisión de realizar un cambio para elevar, reducir o permitir el paso de la tensión hacia la salida, existe una comparación que debe ser controlada con una ventana de histéresis, para asegurar que al momento de la comparación la oscilación de la variación de tensión permita que los cambios se realicen constantemente.

El primer cambio selecciona los devanados del transformador para compensar la tensión de entrada de un 30% al 18%, posteriormente si debido a que la tensión no requiere ser compensada este porcentaje de elevación, se realiza el segundo cambio en el cual la activación y desactivación de los relevadores selecciona los devanados del transformador para permitir contar con una relación uno a uno, en este punto no existe más compensación ni reducción. El tercer cambio se realiza una vez que el regulador detecta una tensión mayor a la nominal, realizando la selección de los devanados permitiendo así una reducción en la salida del regulador.

#### **4.2.3.3. Activación y desactivación de los relevadores y selección de devanados del transformador**

La activación de los relevadores se lleva a cabo de acuerdo con el siguiente diagrama. En la figura 4.5 se muestran los relevadores seleccionando los devanados del transformador, el cual al ser un autotransformador, cuenta con un punto en común, permitiendo que solo los devanados se seleccionen con el fin de obtener varias salidas compensadas.



**Figura 4.5. Activación de los relevadores**

#### 4.2.3.4. Diagrama de flujo del regulador

El siguiente diagrama de flujo muestra la lógica utilizada para la programación en el microcontrolador, para que éste opere como un regulador de tensión y seleccione los devanados del transformador. Ver figura 4.6.

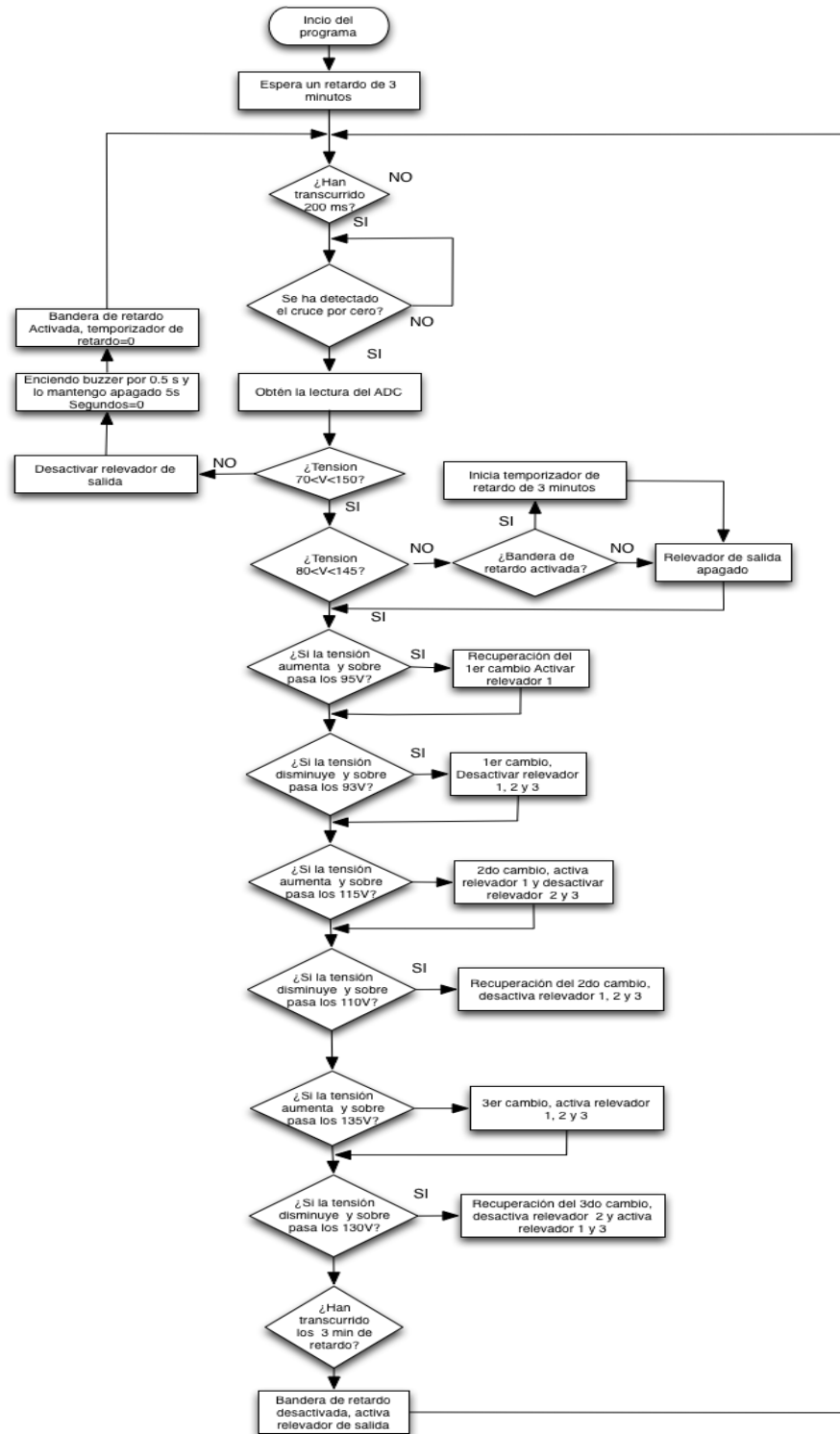


Figura 4.6. Diagrama de flujo de la programación del microcontrolador

### 4.3. Termostato electrónico

Para nuestro diseño se requiere de un dispositivo que sea capaz de censar la temperatura en tiempo real. Esto es necesario para determinar qué acción debe tomar el microcontrolador sobre el encendido y apagado del compresor que mantiene la temperatura del enfriador en un rango de entre  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Para esto se utiliza un termistor NTC B57020 del fabricante EPCOS, también se usa una fuente de tensión constante, un termistor en serie con una resistencia, formando un divisor de tensión.

Para encontrar la tensión  $V_T$  en el termistor se utiliza la ecuación 4.1:

$$V_T = V_S \frac{R_T}{R_S + R_T} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde  $R_S$  es la resistencia de la fuente y  $R_T$  es la resistencia en el termistor.

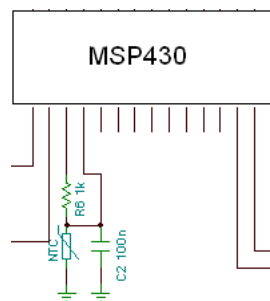
De los valores calculados con datos de la hoja de especificaciones del termistor NTC B57020, en la Tabla 4.4 se muestran los valores de tensión obtenidos para los rangos de temperatura en los cuales necesitamos que el prototipo opere:

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	$R_T$ [W]	$V_T$ [V]
-3	19945.6	2.86
-2	18890.8	2.85
-1	17898.92	2.84
0	16965.83	2.83
1	16087.66	2.82
2	15260.84	2.82
3	14482.04	2.81

**Tabla 4.4. Valores de temperatura vs tensión**

Por lo tanto de los datos obtenidos se observa que cuando la tensión  $V_{in}$  sea mayor a 2.86 V indicará que el microcontrolador debe de mandar a apagar al compresor, de la misma manera si la tensión  $V_{in}$  es menor a 2.81 V el microcontrolador debe de mandar a encender al compresor hasta que llegue al rango de temperatura operativo deseado.

En la figura 4.7 se muestra la conexión utilizada entre el termistor y el microprocesador MSP430.



**Figura 4.7. Conexión del termistor en el microcontrolador**

#### 4.3.1. Obtención del modelo matemático para la programación

A continuación se muestra el código desarrollado para la programación del microcontrolador respecto a la medición de la temperatura.

```
// Medición de temperatura

void Temperatura(void)
{
// Medición de temperatura a través de un arreglo termistor de 50k@25 y
resistencia de 15k
    ADC10CTL0 ^= ENC;
    ADC10CTL1&=~ 0xF000;
```

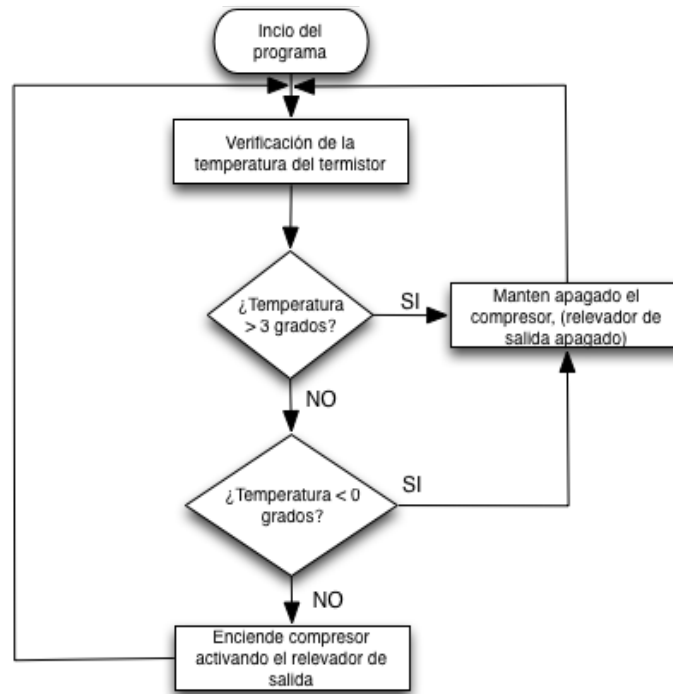
```
    ADC10CTL1|= INCH_6;
ADC10CTL0 |= ENC+ADC10SC;
    while(!(0x01 & Flag_Time));
    Flag_Time &=~0x01;
    Temp=ADC10MEM;
Temp=Temp>>1;
    DatADC(5,1,Temp);

}
```

### 4.3.2. Activación y desactivación del compresor

Para que el interior de un enfriador llegue al punto de temperatura programada, previamente debe encenderse el compresor para que este haga la función de abatir la temperatura. Una vez que se llega al punto mínimo de temperatura, el compresor se apaga.

El interior del enfriador permanece a la temperatura programada, y conforme pasa el tiempo la temperatura aumenta, llegando al punto del gradiente de temperatura programada, realizando en ese instante el control la activación una vez más del compresor para realizar nuevamente el ciclo de enfriado. Esto se ejemplifica en el siguiente diagrama de flujo. Ver figura 4.8.



**Figura 4.8. Diagrama de flujo de la activación y desactivación del compresor**

#### 4.3.3. Visualización del estado de temperatura mediante LCD

Para verificar las condiciones de temperatura del interior del enfriador, se hace uso de la visualización de la temperatura mediante un LCD. El control de temperatura se ha fijado con los límites de [0 °C, 3 °C]. Con un gradiente de 3 grados, la visualización se realiza comparando el valor del convertidor analógico digital y la siguiente ecuación.

$$Temperatura[{}^{\circ}C] = [(-0.0023) \cdot (ValorADC)^2] - [(0.6077) \cdot (ValorADC)] + 317.95[{}^{\circ}C] \text{ (Ecuación 4.2)}$$

Donde el valor del convertidor analógico digital corresponde al valor de temperatura registrado en el arreglo del termistor y cuya tensión proporcional es



interpretada y utilizada para evaluarla en la ecuación 4.2 y así obtener el valor proporcional de temperatura a visualizar. Este procedimiento se observa en la figura 4.9.

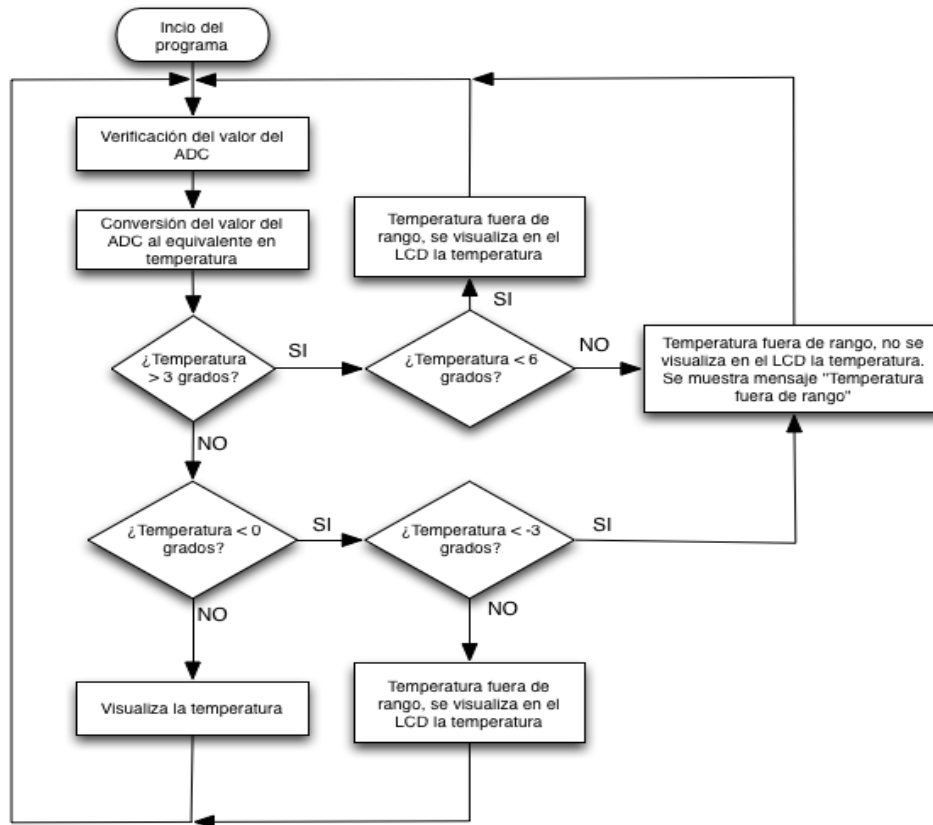


Figura 4.9. Diagrama de flujo de la temperatura en el LCD

La visualización de la temperatura está limitada, a un rango de -3 a 6 °C, que se mostrarán en el LCD, por otra parte, para las temperaturas fuera de este rango se desplegará un mensaje indicando que la temperatura se encuentra fuera de rango.

#### **4.3.4. Programación del deshielo**

Una vez que el compresor se ha encendido, la temperatura al interior de enfriador comenzará a disminuir, de tal manera que se detendrá una vez que haya alcanzado la temperatura objetivo de abatimiento.

Dependiendo de los centímetros cúbicos a los que se deba disminuir su temperatura al interior del enfriador este proceso puede llegar a demorar mucho tiempo. Si la temperatura de enfriamiento aún no se ha alcanzado en un periodo de aproximadamente 6 horas, el termostato deberá destinar una periodo de entre 15 y 30 minutos para detener la marcha del compresor, con el objeto de no permitir que se congele el evaporador del enfriador. Con este periodo de descanso se asegura que no exista escarcha en el evaporador.

De no realizarse este procedimiento, la escarcha que se produce en el evaporador no permitirá que el aire fluya libremente, impidiendo enfriar el aire que circula por ahí. Esto puede llegar al punto de que el enfriador ya no alcance su temperatura de abatimiento debido al estancamiento del aire.

#### **4.3.5. Tiempos mínimos de operación y descanso del compresor**

Debido a que el compresor es el dispositivo que, como su nombre lo indica, comprime el gas refrigerante, éste opera controlando la presión del sistema de enfriamiento a través de un motor. Al encenderse el compresor, el motor requiere generar un torque para entrar en operación, lo cual éste se realiza de manera más suave cuando no existe una diferencia de presiones en el interior del compresor. Por esta razón es necesario considerar en el control de temperatura un periodo de operación y descanso mínimo.

Una vez que el compresor haya encendido, para alcanzar su estabilidad en las presiones, necesita de un periodo mínimo de operación de aproximadamente 180 segundos. Si por alguna circunstancia el interior del enfriador ha alcanzado su temperatura de abatimiento dentro de este tiempo (180 s), el control no permitirá que el compresor se detenga hasta que se haya alcanzado el tiempo mínimo de operación.

Para el caso en el cual el compresor se haya detenido debido a que ha alcanzado su temperatura de objetivo, es necesario que el compresor se mantenga apagado por un periodo de 180 segundos, con la finalidad de que al momento de arrancar nuevamente, la presión en el interior del compresor se haya estabilizado y no requiera de mayor torque el motor para su arranque.

Estos periodos de mínimos de operación y descanso tienen como finalidad proteger el compresor de desgastes por el encendido y apagado de este en periodos cortos; de no realizarse el tiempo de vida de el compresor se acortaría.

#### **4.3.6. Jerarquías de activación y desactivación del compresor**

El encendido y apagado del compresor está regido por las peticiones que el control demande. Sin embargo existen condiciones en la cual las activaciones y desactivaciones del compresor se deben llevar a cabo de acuerdo con las condiciones de operación.

Ya se explicó que el compresor debe contar con un periodo mínimo de operación y descanso, estas decisiones son regidas por el control que cuenta con la programación de cuando debe encenderse y apagarse, ya sea por el gradiente de temperatura o por los tiempos mínimos de operación.

El control de temperatura es operado por el microcontrolador, que a su vez está monitoreando la tensión de alimentación del compresor regulando la tensión hacia el enfriador. Este regulador tiene el control total del compresor ya que una vez que este haya detectado una tensión fuera de los límites de operación, no importa si el enfriador se encuentre dentro del periodo mínimo de operación, el control que opera la parte de regulación cuenta con la mayor jerarquía y apagará el compresor para protegerlo de los valores excesivos o bajos de tensión.

#### 4.4. Unificación de los elementos en un solo dispositivo

Para llevar a cabo la unificación del todo el sistema es necesario crear el programa un núcleo (kernel) que permita realizar las operaciones en paralelo, con el objeto de que el sistema trabaje monitorizando cada una de sus funciones permitiendo que el sistema sea multitareas. Ver la figura 4.10.

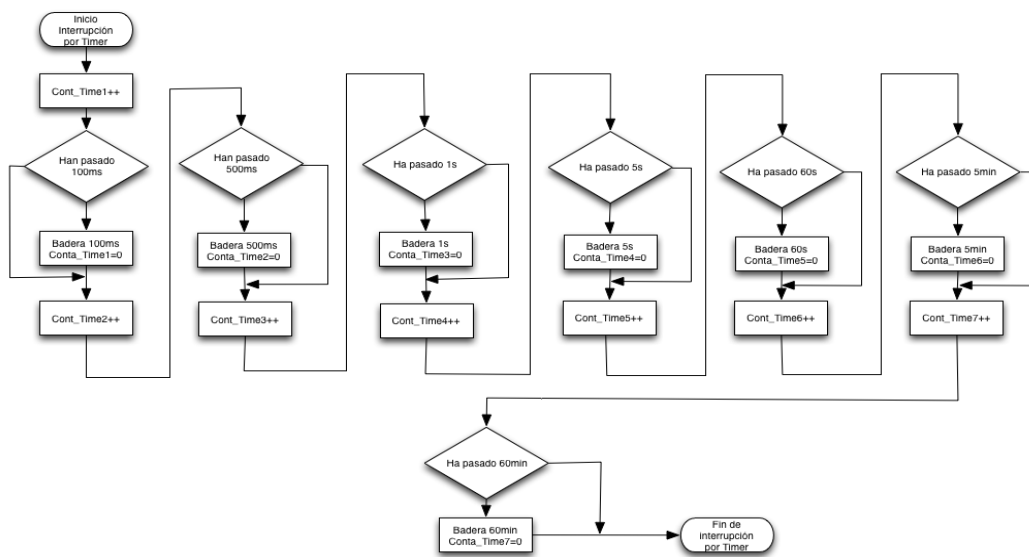


Figura 4.10. Diagrama de flujo de los elementos en un solo dispositivo

El siguiente código muestra la forma en que se obtiene una base de tiempo, para permitir que el microcontrolador realice operaciones en paralelo.

El código del programa núcleo que se que se ejecuta todo el tiempo (kernel) se muestra en apéndice D

La figura 4.11 muestra el diagrama de flujo utilizado para generar el programa base y permitir que el microcontrolador realice operaciones en paralelo.

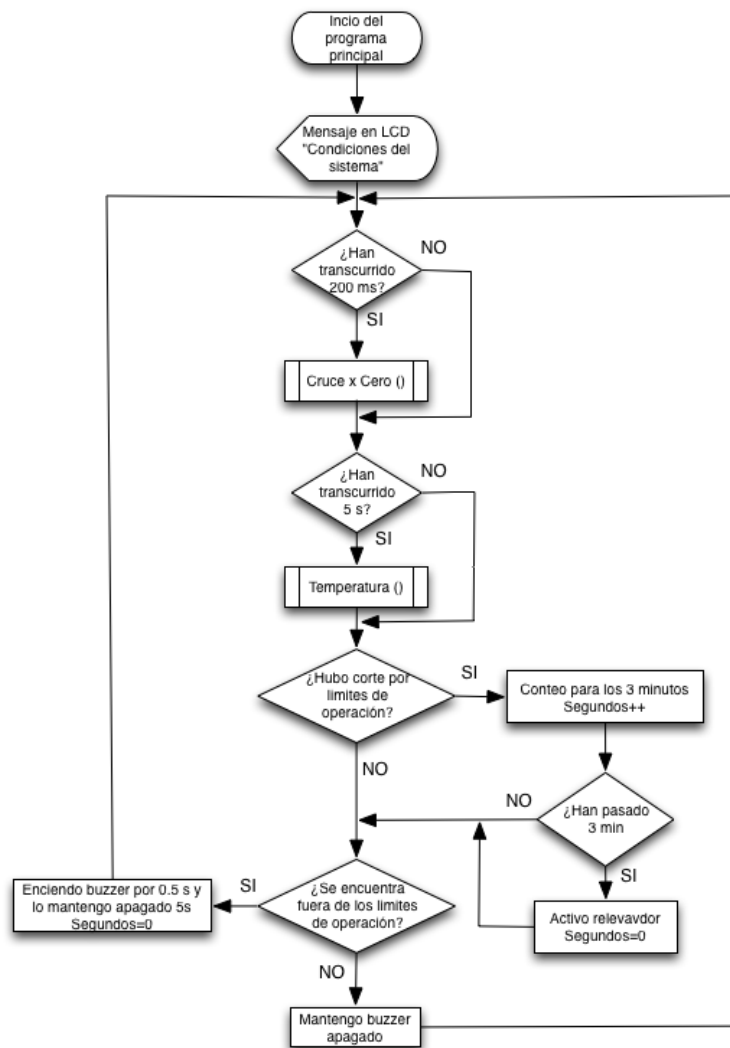


Figura 4.11. Diagrama de flujo para obtener una base de tiempo

#### 4.5. Construcción del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se tuvo que reunir un conjunto de materiales para su fabricación. A continuación se enlistan los materiales requeridos para la fabricación del prototipo. Ver Tabla 4.5.

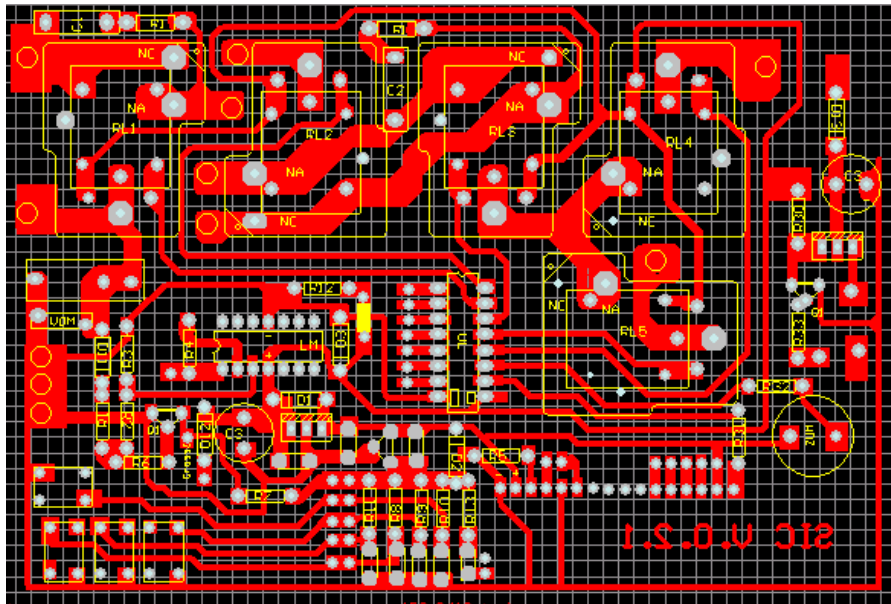
Cantidad	Lista de materiales
1	Placa fenólica 15 x 10 cm
4	Relevadores tipo T7 12Vdc a 15A
1	Circuito integrado LM324
1	Sonda con termistor de 5K@25C
1	Autotransformador 1500 VA
1	Regulador LM7805
1	Regulador LM78L33
1	Transistor BC337
1	Capacitor electrolítico 680 uF a 25V
1	Varistor 241KD14
1	Capacitor de poliéster 0.1 uF a 250V
3	Capacitor de poliéster 0.1 uF a 35V
15	Resistencia de carbón a 1/4 W 5%, varios valores
1	Led 5mm rojo
1	Circuito integrado ULN2003
1	Pantalla LCD 2X15
1	Módulo MPS-TS430DA38 Texas Instruments
1	Microcontrolador MSP430F2274
1	Buzzer 12 mm
4	Diodo 4N4001
1	Arnés de interconexión 5 vías
1	Arnés fast on 1/8 macho y hembra
1	Cable pot calibre 16 AWG a 1.8 metros
1	Transformador reductor 127/12V, con fuente

**Tabla 4.5. Lista de materiales para el prototipo**

#### 4.5.1. Diseño de PCB

De acuerdo con el diseño previamente armado en una tarjeta de prueba, y obteniendo resultados satisfactorios se procede a desarrollar el PCB para contar con un prototipo funcional.

El diseño del PCB está basado en el esquemático de la figura 3.14, el cual con la ayuda del software Altium Protel DXP se desarrolló una de las tarjetas de control que conforman el diseño completo.



**Figura 4.12. Diseño del circuito impreso en Altium Protel**

La tarjeta de control está constituida por 2 tarjetas, la primera contiene los elementos de sensado de temperatura y tensión y la etapa de potencia, la segunda tarjeta es el módulo de desarrollo MPS-TS430DA38 de Texas Instruments, la cual cuenta con un zócalo para la colocación del microcontrolador.

Este módulo es una tarjeta de desarrollo, utilizada para hacer pruebas con el microcontrolador y cuenta con conexiones para periféricos. A continuación se muestra en la figura 4.13 el esquemático de la tarjeta de desarrollo.

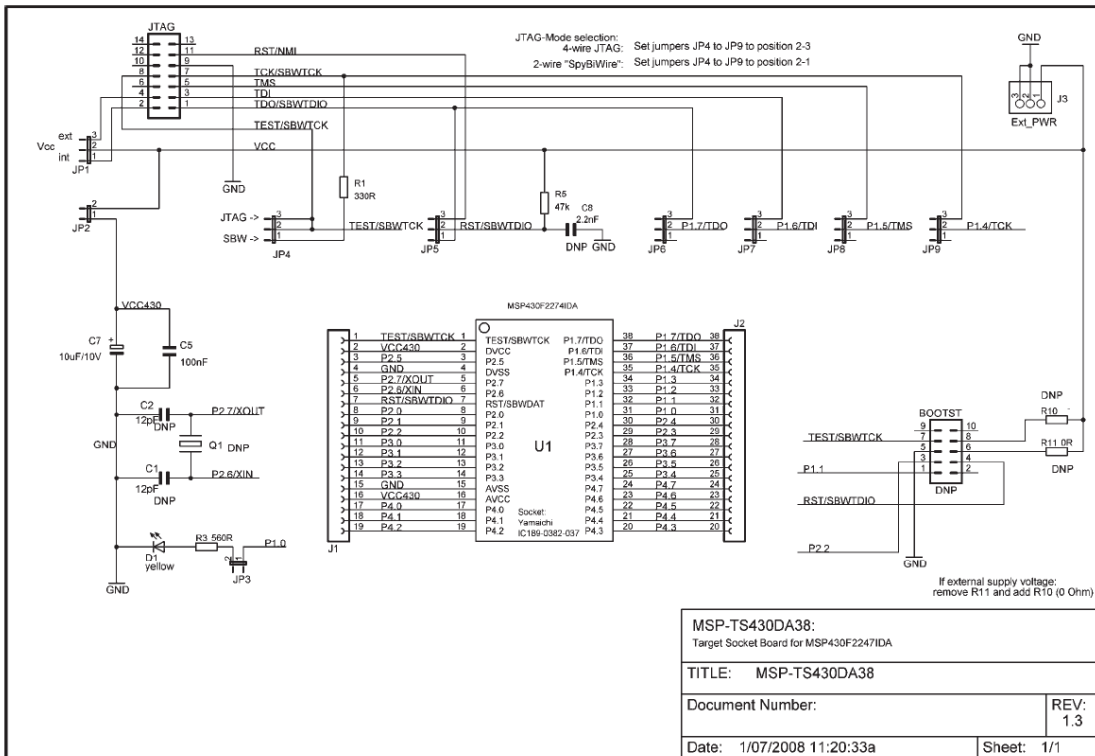


Figura 4.13. Esquemático de la tarjeta de desarrollo MPS-TS430DA38

En la figura 4.14 se observa el módulo utilizado de la tarjeta MPS-TS430DA38.

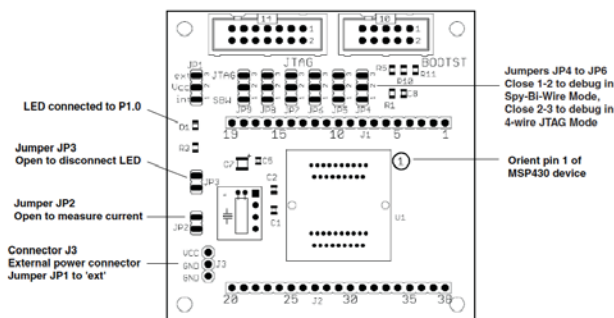
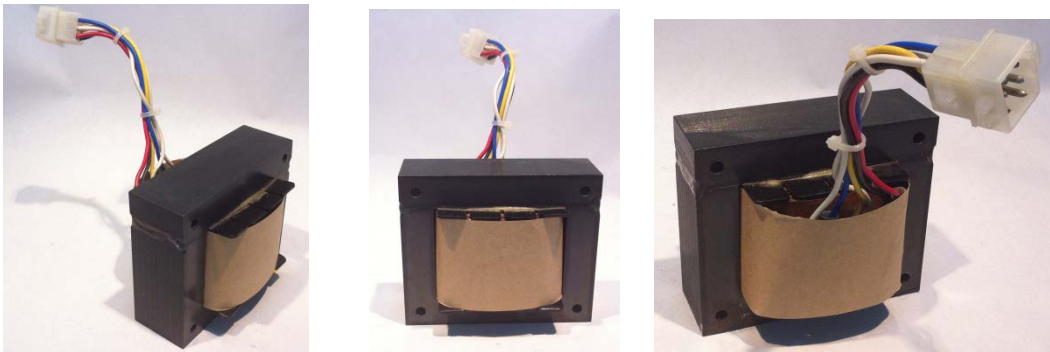


Figura 4.14. Módulo de tarjeta MPS-TS430DA38 con socket, pcb



#### 4.5.2. Autotransformador para la etapa de potencia

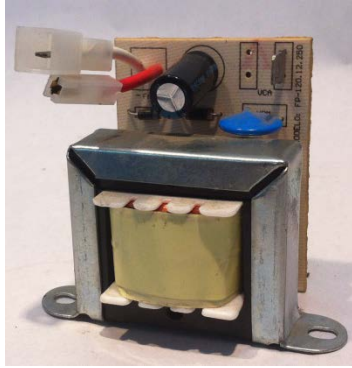
El autotransformador es el elemento que proporcionará la energía que será controlada a través de la selección de los devanados con los relevadores, éstos harán la función de compensador o reductor de tensión de salida hacia la carga conectada. Sus características son las siguientes y la fotografía se muestra en la figura 4.15. Este transformador tiene la capacidad de demandarle 12.5 A. Posee una laminación E-I 137 calibre 24 silicio y tiene una capacidad de 1500 VA.



**Figura 4.15. Autotransformador utilizado en el prototipo**

#### 4.5.3. Transformador reductor para la alimentación del circuito de control

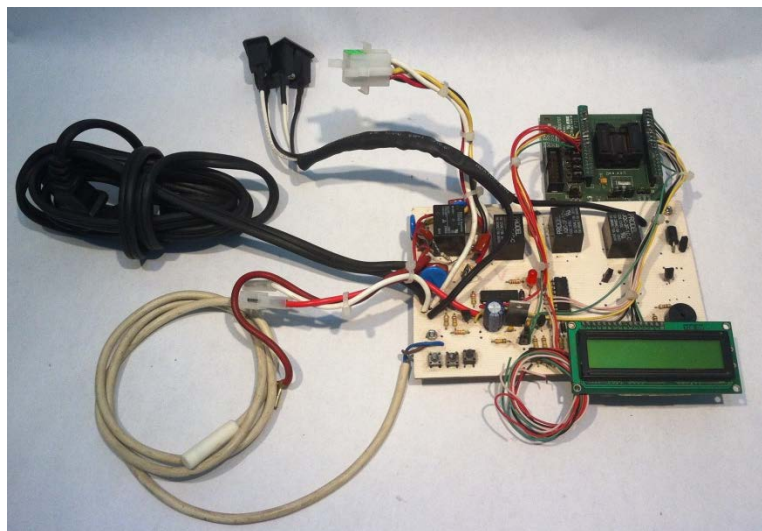
El transformador reductor cuenta con una tarjeta en la cual se conecta el transformador de devanados separados, la reducción cuenta con un tap central para realizar una conexión con diodos y de esta manera contar con una fuente de rectificación de onda completa. La tarjeta se muestra en la figura 4.16.



**Figura 4.16. Transformador reductor con devanados separados 127/12V**

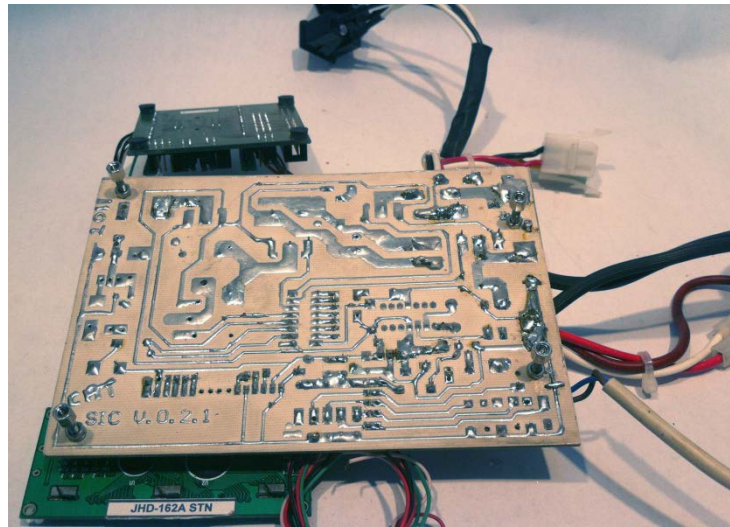
#### **4.5.4. Prototipo final**

Una vez contando con todos los materiales se procede a la fabricación del prototipo. Se realiza la conjugación de todos los elementos para finalmente realizar las pruebas de funcionamiento necesarias. En la figura 4.17 se muestra el prototipo en su ensamble final visto en su cara superior.



**Figura 4.17. Prototipo del Sistema Integral de Control para Refrigeración Comercial vista superior**

En la figura 4.18 se observa cara inferior del prototipo ensamblado.



**Figura 4.18. Prototipo del Sistema Integral de Control para Refrigeración Comercial vista inferior**

## **CAPÍTULO V. PRUEBAS, AJUSTES Y RESULTADOS**

El Sistema Integral de Control es la fusión de dos dispositivos que trabajan de manera independiente como termostato electrónico y un regulador de tensión. A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño de cada uno de los elementos por separado y cada una de las funciones del dispositivo fabricado.

Una vez construido el prototipo se somete a la primera prueba de funcionamiento para verificar su comportamiento en condiciones reales. Se realiza la instalación del prototipo en un enfriador de dos puertas tipo comercial para refrigeración de refrescos.

Las pruebas de funcionalidad consisten en probar el dispositivo en sus dos principales características en condiciones reales, las cuales son activar y desactivar el compresor para que este abata la temperatura. Aquí se comprobará que el sensado de temperatura se lleva de acuerdo con análisis realizado y a la programación realizada. Adicional se verificarán los periodos de deshielo gráficamente con ayuda de un equipo registrador de temperatura.

Con ayuda de un variac (autotransformador), se variará la tensión de alimentación al regulador para simular el comportamiento real de una línea de tensión comercial cerca de los valores de cambio programados por el prototipo.

Las pruebas se realizaron con un enfriador de dos puertas cuyas características son las siguientes y en la figura 5.1 se muestra la fotografía del enfriador utilizado.

- Capacidad Bruta 664litros / 23.5cu.ft.
- Capacidad Neta 409litros / 14.4cu.ft.
- Ancho del Gabinete Interno 900mm / 35.4in



**Figura 5.1. Modelo de enfriador de 2 puertas utilizado para las pruebas**

- Profundidad del Gabinete Interno 550mm / 21.6in
- Alto del Gabinete Interno 1342mm / 52.8in
- Ancho Externo 1000mm / 39.4in
- Profundidad Externa 660mm / 26.0in
- Altura Externa 1830mm / 72.0in
- Tensión / Frecuencia 115V y 127V / 60Hz
- Rango de Temperatura °C 0 a 4°C
- Cantidad de Puertas/Tapas 2
- Material Gabinete Externo Lámina Prepintada Cal.28
- Material Gabinete Interno Lámina Prepintada Cal.28
- Tipo de Apertura No Abatible
- Tipo del Evaporador Dinámico
- Tipo de Gas Refrigerante R-134<sup>a</sup>
- Tipo de Aislamiento Poliuretano (R141b)
- Tipo de Pintura Poliéster
- Tipo de Condensación Forzada
- Consumo de energía 3.4 kWhr / 24h
- Compresor ¼ hp

### 5.1. Prueba de funcionalidad del termostato

Los primeros parámetros que se prueban del prototipo son los relacionados con la parte del termostato electrónico, cuya función es controlar la temperatura interna del enfriador. El termostato se ha calibrado para que opere en un rango de operación de 0°C a 3°C y para activar el compresor con un periodo de trabajo de 6 horas continuas contando con un periodo de deshielo de 30 minutos.

Con ayuda de un sensor de temperatura se registra en una gráfica el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, el muestreo se realiza cada minuto.

En la figura 5.2 se muestra la manera en que se coloca el termistor dentro del enfriador para realizar la prueba.

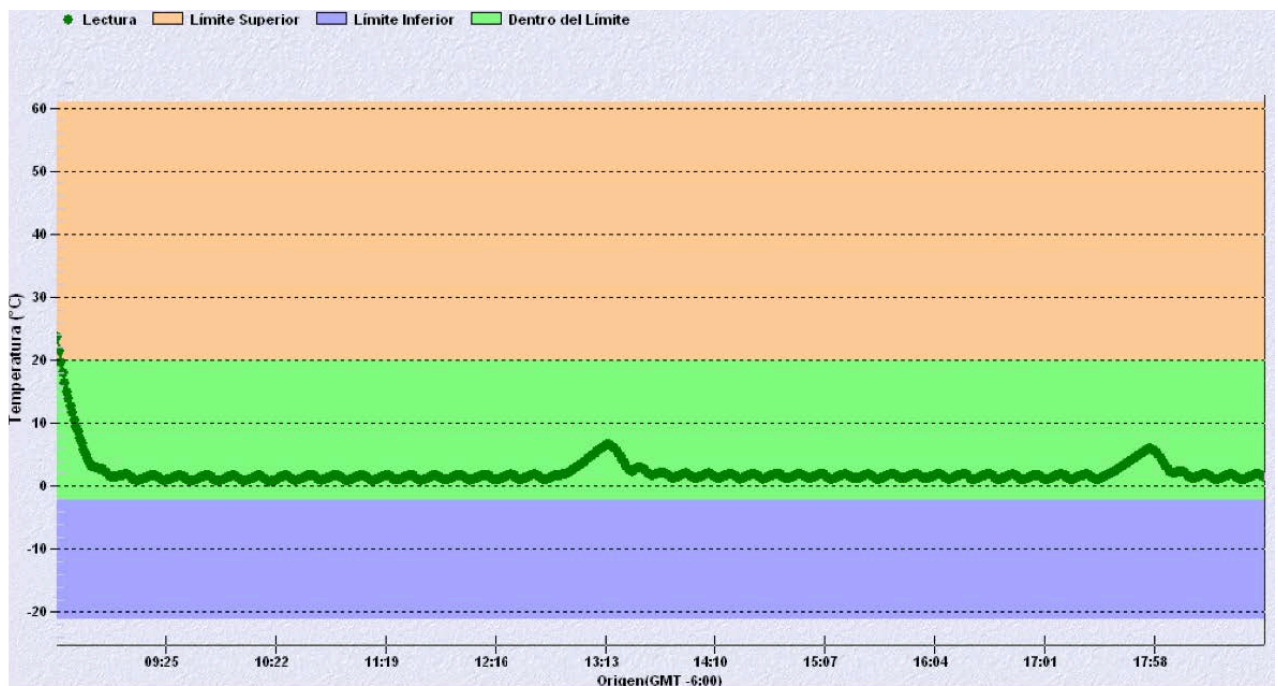
La primera prueba consistió en conectar el prototipo en el enfriador durante diez horas ininterrumpidas y se tomaron los valores de temperatura del interior con el registrador, arrojando los resultados descritos a continuación.



**Figura 5.2. Colocación de termistor en el ventilador del interior del enfriador para el sensado de temperatura**

En la gráfica de la figura 5.3 se muestra que la temperatura inicial del interior del enfriador fue de 22.9°C, el control inicia el encendido del compresor y la temperatura del interior del enfriador va disminuyendo hasta llegar hasta una temperatura de 0.9°C en un periodo de 40 minutos.

Durante los 40 minutos en control sensa la temperatura y mantiene el compresor encendido hasta que el interior del enfriador llegue a su temperatura objetivo de 0°C.



**Figura 5.3. Comportamiento de la temperatura de un enfriador controlador por un Sistema Integral de Control para Refrigeración Comercial, con ciclos de activación y desactivación del compresor y periodos de deshielo**

A continuación se muestra la Tabla 5.1 que despliega las lecturas tomadas por el registrador, el cual monitoriza cada minuto la temperatura al interior del enfriador.



Muestra	Hora	°C	Compresor
1	08:29:14	23.6	Encendido
2	08:30:14	21.5	
3	08:31:14	19.6	
4	08:32:14	17.9	
5	08:33:14	16.4	
6	08:34:14	15.0	
7	08:35:14	13.8	
8	08:36:14	12.6	
9	08:37:14	11.6	
10	08:38:14	10.5	
11	08:39:14	9.5	
12	08:40:14	8.5	
13	08:41:14	7.6	
14	08:42:14	6.7	
15	08:43:14	5.8	
16	08:44:14	5.0	
17	08:45:14	4.3	
18	08:46:14	3.6	
19	08:47:14	3.2	
20	08:48:14	3.0	
21	08:49:14	2.8	
22	08:50:14	2.8	
23	08:51:14	2.7	
24	08:52:14	2.7	
25	08:53:14	2.6	
26	08:54:14	2.3	
27	08:55:14	2.0	
28	08:56:14	1.7	
29	08:57:14	1.5	
30	08:58:14	1.4	
31	08:59:14	1.4	
32	09:00:14	1.5	
33	09:01:14	1.6	
34	09:02:14	1.7	
35	09:03:14	1.7	



36	09:04:14	1.8	
37	09:05:14	1.8	
38	09:06:14	1.7	
39	09:07:14	1.4	
40	09:08:14	1.1	
41	09:09:14	1.0	
42	09:10:14	0.9	
43	09:11:14	0.9	

**Tabla 5.1. Primera monitorización del comportamiento de temperatura del Sistema Integral de Control para Refrigeración**

Se observa que la temperatura mínima alcanzada después de 40 minutos del encendido del compresor es de 0.9 °C (ver Tabla 5.2), en ese instante el compresor se detiene ya que el control de temperatura está programado para que opere hasta llegar a este punto.

Una vez llegado a ese punto, la temperatura empieza a ascender hasta un valor programado de 3 °C.

Los datos registrados que se despliegan en la Tabla 5.2 muestran que la temperatura mínima alcanzada es de 0.9 °C, en ese instante el compresor se apaga, la temperatura del interior del enfriador empieza a aumentar y al momento de detectar una temperatura de 1.7 °C el control envía la instrucción para volver a encender el compresor para disminuir la temperatura.

Muestra	Hora	°C	Compresor
42	09:10:14	0.9	Apagado
43	09:11:14	0.9	
44	09:12:14	1.0	
45	09:13:14	1.1	
46	09:14:14	1.2	
47	09:15:14	1.3	
48	09:16:14	1.4	

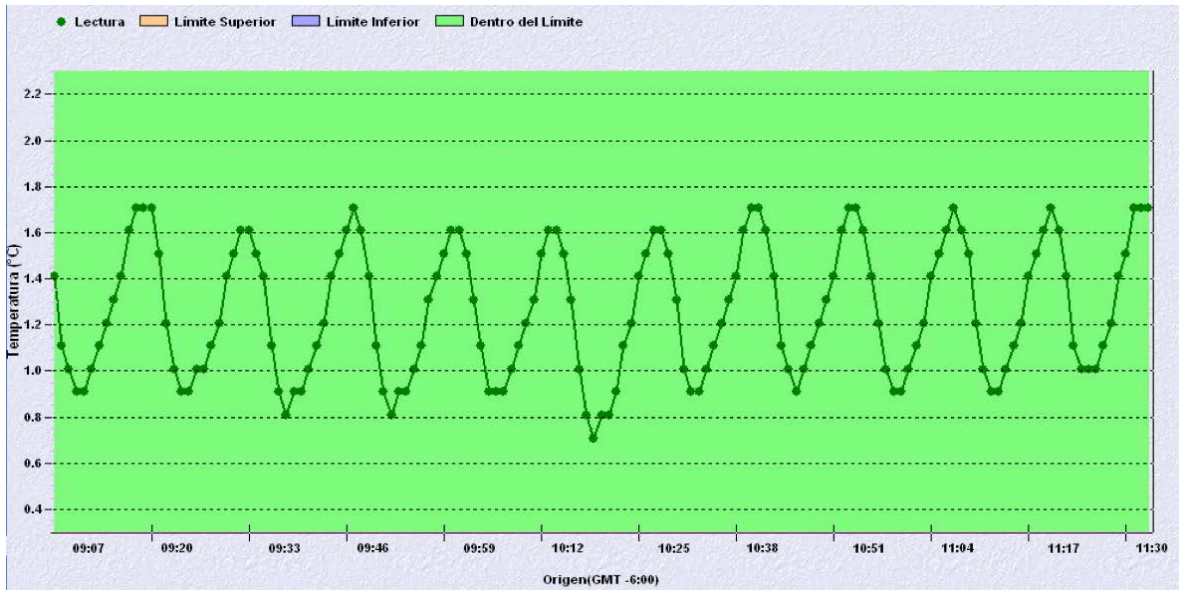
49	09:17:14	1.6	
50	09:18:14	1.7	
51	09:19:14	1.7	
52	09:20:14	1.7	Encendido
53	09:21:14	1.5	
54	09:22:14	1.2	
55	09:23:14	1.0	
56	09:24:14	0.9	
57	09:25:14	0.9	Apagado
58	09:26:14	1.0	
59	09:27:14	1.0	
60	09:28:14	1.1	
61	09:29:14	1.2	
62	09:30:14	1.4	
63	09:31:14	1.5	
64	09:32:14	1.6	
65	09:33:14	1.6	Encendido
66	09:34:14	1.5	
67	09:35:14	1.4	
68	09:36:14	1.1	
69	09:37:14	0.9	
70	09:38:14	0.8	

**Tabla 5.2. Datos obtenidos en la primera prueba los ciclos de operación en el interior del enfriador.**

El control tiene programado que opere en un rango de 0°C y 3°C, con un gradiente de temperatura de 3 °C, en los datos registrados; como se ve observa en la Tabla 5.2; no muestran un comportamiento correcto, el programa se debe modificar para calibrar este punto para que inicie una vez que alcance una temperatura de 3°C.

La gráfica de la figura 5.4 muestra una acercamiento más puntual del comportamiento de los ciclos de encendido y apagado dentro del gradiente de

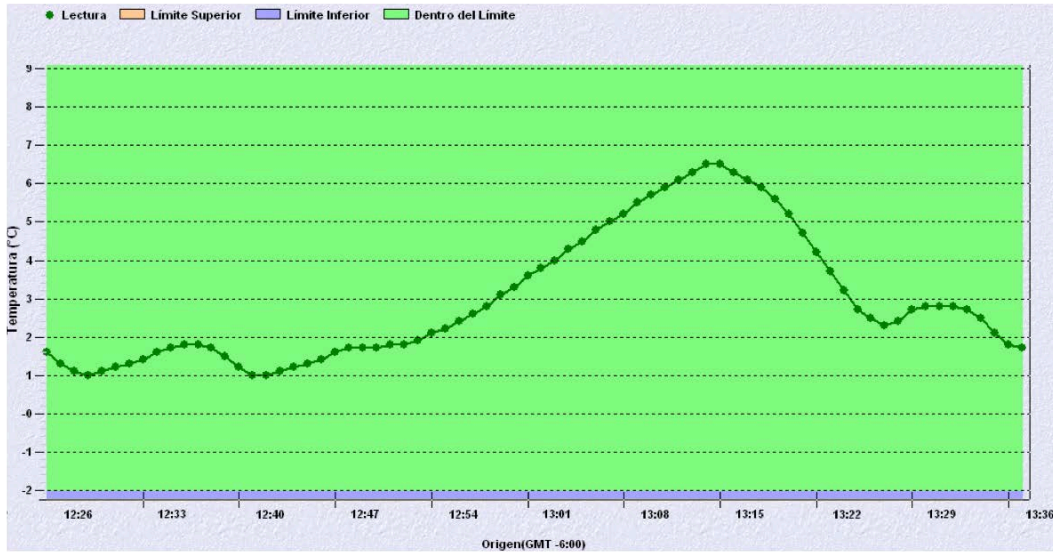
temperatura. Aquí se observa que la temperatura máxima no alcanza la temperatura objetivo de 3 °C por lo cual es necesario programar la corrección.



**Figura 5.4. Comportamiento de la temperatura en los ciclos de operación del compresor**

### 5.1.1. Verificación del ciclo de deshielo del controlador

Como se explicó en el capítulo anterior, este control cuenta con un ciclo de deshielo, con el objeto de evitar que se congele la tubería del interior del enfriador. La gráfica de la figura 5.5, muestra una sección del comportamiento del interior del enfriador al momento en el que se tiene el periodo de deshielo después de 6 horas de operación constante, la temperatura máxima alcanzada fue de 6.5 °C permaneciendo apagado el compresor por un lapso de 30 minutos.



**Figura 5.5. Gráfica de paro del compresor después de 6 horas de operación continúa**

La tabla siguiente muestra la temperatura del interior del enfriador al momento de que el compresor se apaga para comenzar el tiempo de deshielo. Ver Tabla 5.3.

Muestra	Hora	°C	Compresor
253	12:41:14 p.m.	1.0	Apagado
254	12:42:14 p.m.	1.0	
255	12:43:14 p.m.	1.1	
256	12:44:14 p.m.	1.2	
257	12:45:14 p.m.	1.3	
258	12:46:14 p.m.	1.4	
259	12:47:14 p.m.	1.6	
260	12:48:14 p.m.	1.7	
261	12:49:14 p.m.	1.7	
262	12:50:14 p.m.	1.7	
263	12:51:14 p.m.	1.8	
264	12:52:14 p.m.	1.8	
265	12:53:14 p.m.	1.9	

266	12:54:14 p.m.	2.1
267	12:55:14 p.m.	2.2
268	12:56:14 p.m.	2.4
269	12:57:14 p.m.	2.6
270	12:58:14 p.m.	2.8
271	12:59:14 p.m.	3.1
272	01:00:14 p.m.	3.3
273	01:01:14 p.m.	3.6
274	01:02:14 p.m.	3.8
275	01:03:14 p.m.	4.0
276	01:04:14 p.m.	4.3
277	01:05:14 p.m.	4.5
278	01:06:14 p.m.	4.8
279	01:07:14 p.m.	5.0
280	01:08:14 p.m.	5.2
281	01:09:14 p.m.	5.5
282	01:10:14 p.m.	5.7
283	01:11:14 p.m.	5.9
284	01:12:14 p.m.	6.1
285	01:13:14 p.m.	6.3
286	01:14:14 p.m.	6.5

**Tabla 5.3. Datos de temperatura al momento que el compresor se mantiene apagado por el ciclo de deshielo**

Una vez que han transcurrido los 30 minutos de deshielo, el compresor inicia su ciclo de operación controlado por el prototipo, la Tabla 5.4 muestra el comportamiento del interior del enfriador una vez que el compresor se enciende una vez más.

Muestra	Hora	°C	Compresor
287	01:15:14 p.m.	6.5	Encendido
288	01:16:14 p.m.	6.3	
289	01:17:14 p.m.	6.1	
290	01:18:14 p.m.	5.9	
291	01:19:14 p.m.	5.6	
292	01:20:14 p.m.	5.2	
293	01:21:14 p.m.	4.7	
294	01:22:14 p.m.	4.2	
295	01:23:14 p.m.	3.7	
296	01:24:14 p.m.	3.2	
297	01:25:14 p.m.	2.7	
298	01:26:14 p.m.	2.5	
299	01:27:14 p.m.	2.3	
300	01:28:14 p.m.	2.4	
301	01:29:14 p.m.	2.7	
302	01:30:14 p.m.	2.8	
303	01:31:14 p.m.	2.8	
304	01:32:14 p.m.	2.8	
305	01:33:14 p.m.	2.7	
306	01:34:14 p.m.	2.5	
307	01:35:14 p.m.	2.1	
308	01:36:14 p.m.	1.8	
309	01:37:14 p.m.	1.7	
310	01:38:14 p.m.	1.7	

**Tabla 5.4. Datos de temperatura al momento de que el compresor se enciende una vez que se cumple el ciclo de deshielo**

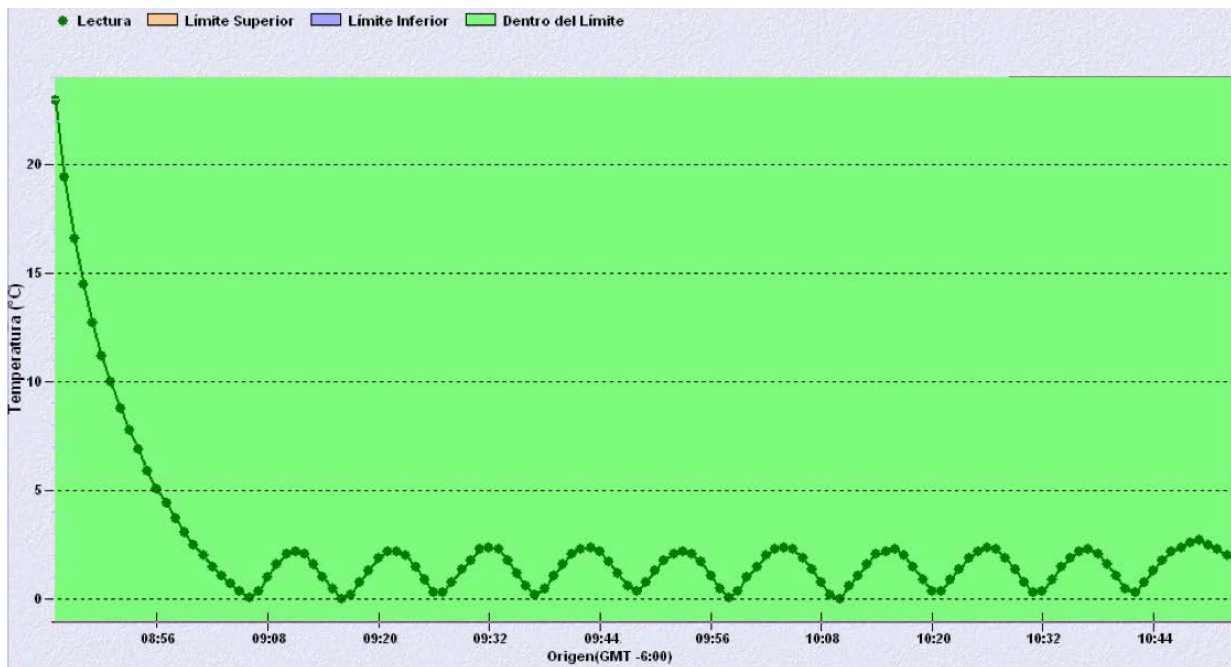
## 5.2. Calibración del termostato

Al verificar el comportamiento del termostato, se observa que es necesario calibrarlo, ya que el gradiente de temperatura no cumplía con los 3 °C.

Se reprograman los puntos de comparación del termostato y se realiza la prueba una vez más, conectando el prototipo en el enfriador por un periodo de tres horas para corroborar el comportamiento.

La gráfica de la figura 5.6 muestra el comportamiento del termostato, entre la temperatura interna del enfriador contra el tiempo que le lleva abatir la temperatura, la temperatura inicial es superior a los 20 °C, después de varios minutos llega a la temperatura mínima de 0°C, realizando el ciclo de desconexión del compresor una vez que llegó a la temperatura objetivo.

Al cumplirse el gradiente de temperatura, y aumentar la temperatura del interior del enfriador, el control al momento de monitorizar esta temperatura, pone en marcha una vez más el compresor para abatir una vez más la temperatura del interior.



**Figura 5.6. Comportamiento de la temperatura en el interior del enfriador con la reprogramación de los puntos de comparación**

El comportamiento del termostato mejora ya que la temperatura del interior del enfriador cumple con el gradiente de temperatura programado como se puede observar en la figura 5.7.



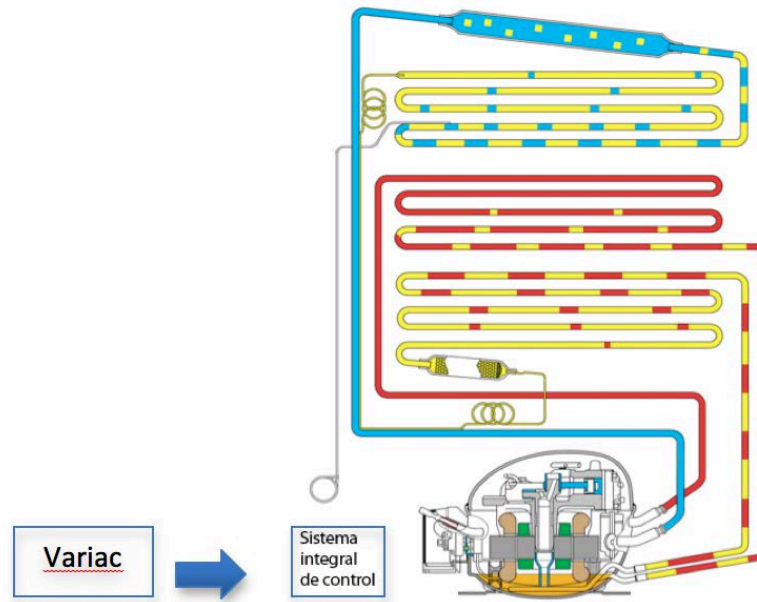
**Figura 5.7.** El comportamiento del control de temperatura presenta un funcionamiento adecuado, la gráfica presenta un valor máximo de 2.7 °C y un mínimo de 0.3°C

### 5.3. Prueba de funcionalidad del regulador de tensión

La prueba de funcionamiento del regulador de tensión se llevó a cabo en un sistema de refrigeración real, en el cual la carga a controlar las variaciones de tensión fue un compresor de ¼ hp.

La figura 5.8 muestra el esquema de conexión de un variac que es utilizado para simular las variaciones de tensión a la entrada del regulador, ésta a su vez energiza el compresor mientras que el control, en el mismo instante, está monitorizando la temperatura interna del enfriador.

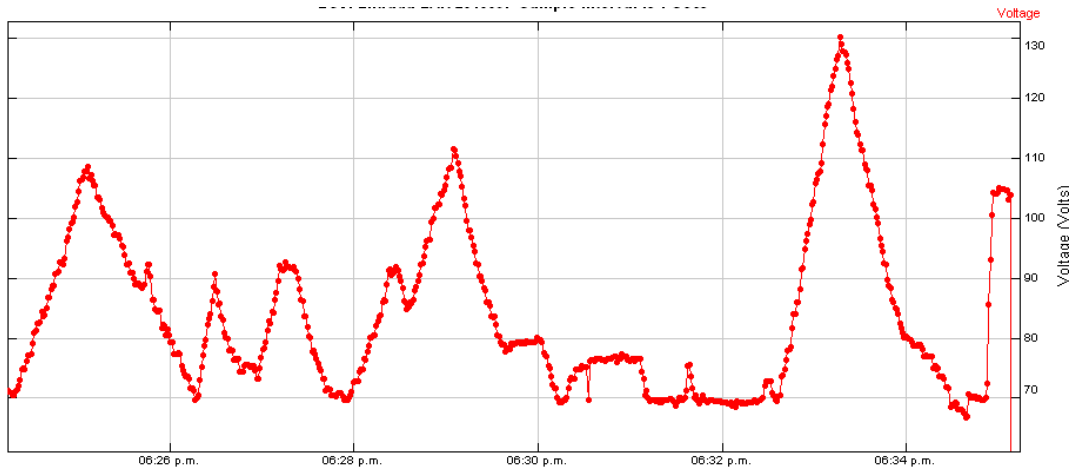




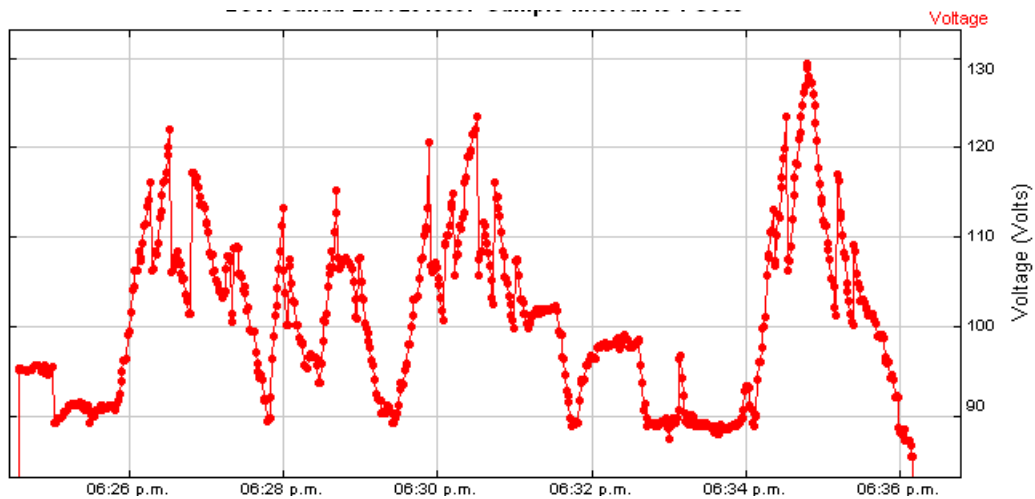
**Figura 5.8. Esquemático de conexión del prototipo en un sistema de refrigeración**

Se coloca un registrador de tensión para monitorizar las variaciones que existen tanto de entrada como de salida del prototipo. Las revisiones se realizan cada segundo con el la finalidad de obtener la mayor resolución de los datos muestreados.

La gráfica de la figura 5.9, muestra el comportamiento de las variaciones de tensión de entrada al regulador, las cuales oscilan entre 70 y 130 V<sub>AC</sub>, mientras que la gráfica de la figura 5.10, representa la salida del regulador con respecto a la entrada.



**Figura 5.9. Variaciones de tensión de entrada al regulador**



**Figura 5.10 Tensión de salida del regulador respecto a la entrada**

Las gráficas representan el comportamiento del regulador, se observa en la figura 5.9 que mientras la tensión de entrada es más uniforme en sus variaciones, en la figura 5.10 se muestra que en la salida se tienen compensaciones y reducciones para proteger al compresor de tensiones muy bajas o muy altas.

## CONCLUSIONES

Al final de este trabajo, el nuevo prototipo logra integrar de manera exitosa dos dispositivos, el termostato y el regulador, que al día de hoy en la industria de la refrigeración se usan por separado.

Como consecuencia de lo mencionado anteriormente este prototipo ayuda a reducir los puntos de falla en la construcción de dispositivos de refrigeración como los mencionados a lo largo de este trabajo.

Se logra una reducción de costos en materiales ya que no se compran los dispositivos por separado

El rango de operación del prototipo es mayor que el de los dispositivos que se distribuyen actualmente de manera comercial. Esto tiene como ventaja una mayor flexibilidad al poder operar en regiones en donde las condiciones de la red eléctrica no sean las ideales.

El prototipo logra alargar la vida útil del compresor protegiéndolo de las variaciones de tensión que puedan existir en la red eléctrica, acoplándolo de tal manera que trabaje  $\pm 10\%$  de su tensión nominal.

El uso de un microcontrolador en este dispositivos, permitirá agregar características adicionales en futuras versiones del prototipo, tales como: ahorro de energía, reporte de apertura de puertas, monitoreo remoto, control de apertura, etc.

## APÉNDICES

## APENDICE A



Temperature measurement	B57020
Probe assemblies	M2020

## R/T characteristics

B57020M2502A017						
R/T No.	2003					
T (°C)	B <sub>25/100</sub> = 3980 K, R <sub>25</sub> = 5000 Ω, T <sub>R</sub> = 0 °C, ΔR <sub>R</sub> /R <sub>R</sub> = ± 2%					
	R <sub>nom</sub> [Ω]	R <sub>min</sub> [Ω]	R <sub>max</sub> [Ω]	ΔR <sub>R</sub> /R <sub>R</sub> [±%]	ΔT[±°C]	α (%/K)
-40.0	169160	159350	178970	5.8	0.9	6.7
-35.0	121800	115390	128200	5.3	0.8	6.5
-30.0	88766	84552	92979	4.7	0.8	6.2
-25.0	65333	62555	68111	4.3	0.7	6.0
-20.0	48614	46778	50450	3.8	0.6	5.8
-15.0	36503	35291	37715	3.3	0.6	5.6
-10.0	27680	26883	28478	2.9	0.5	5.5
-5.0	21166	20646	21686	2.5	0.5	5.3
<b>0.0</b>	<b>16330</b>	<b>16003</b>	<b>16657</b>	<b>2.0</b>	<b>0.4</b>	<b>5.1</b>
5.0	12696	12386	13006	2.4	0.5	5.0
10.0	9951	9670	10232	2.8	0.6	4.8
15.0	7855	7604	8105	3.2	0.7	4.7
20.0	6246	6025	6467	3.5	0.8	4.5
25.0	5000	4806	5194	3.9	0.9	4.4
30.0	4029	3859	4198	4.2	1.0	4.3
35.0	3266	3118	3414	4.5	1.1	4.1
40.0	2665	2535	2794	4.8	1.2	4.0
45.0	2186	2073	2298	5.1	1.3	3.9
50.0	1803	1705	1901	5.4	1.4	3.8
55.0	1495	1410	1581	5.7	1.5	3.7
60.0	1247	1172	1321	6.0	1.7	3.6
65.0	1044	979.0	1110	6.3	1.8	3.5
70.0	878.9	821.7	936.1	6.5	1.9	3.4
75.0	743.1	692.9	793.4	6.8	2.0	3.3
80.0	631.0	586.9	675.2	7.0	2.2	3.2

## APENDICE B

Instrucciones para la detección del cruce por cero

```
void CrossZero(void)
{
    P1IFG &=~0X01;          //LIMPIA BANDERA DE INTERRUPCION
    while(!(0x01 & P1IFG)); //
    P1IFG &=~0X01;          //LIMPIA BANDERA DE INTERRUPCION
    FlagInt &=~0x01 ;      //limpio bandera
    iii = 470;              // Retardo
do (iii--);
    while (iii != 0);
    VOLTAJE();
P1IE &=~0x01; //DESHABILITA INTERRUPCION POR TRANSICION
}
}
```

## APENDICE C

Código para la selección de los taps

```
void VOLTAJE(void)
{
    //Monitorizar de la línea de alimentación
    //FFlag_G_H
    // Asegurarse que al principio del programa está en cero
//  +---+---+---+---+---+---+---+---+
//  | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
//  +---+---+---+---+---+---+---+---+
    //0: Límite Inferior
    //1: Límite superior
    //2: Elevación
    //3: Reducción
    //4: Recuperación L Inferior
// Obtienen el voltaje de línea en un Pin específico
//P2.0: Relevador 1, alimentación de salida
//P2.1: Relevador 2, selecciona la reducción
//P2.2: Relevador 3, cambia
//P2.3 Buzzer
//P2.4

    ADC10CTL0 ^= ENC;
    VAC=ADC();
    if( VAC > 281 && VAC <= 537) //Si está fuera del rango no entras
hasta que haya recuperación
    {

        // Char_XY(' ',15,0);
        if( 0x01 & FFlag_G_H ) // si hubo corte por Linf verifica
recuperación con histéresis
        {
            if(VAC >=281)
            {
                FFlag_G_H &=~ 0x01; // Ya recuperó por límite inferior
            }
        }
    }
}
```

```
    }
  }
  if( 0x02 & FFlag_G_H ) // si hubo corte por LS verifica
recuperación con histéresis
  {
    if( VAC <= 537)
    {
      FFlag_G_H &=~ 0x02; // Ya recuperó por límite superior
      P2OUT |= 0x01; //Activa Relevador de Salida ya que recupero
    }

  }
  Flag_Ret &=~ 0x01;//La bandera se limpia el buzzer se apaga
  // /**Revisión ELEVACION REDUCCION Y 1:1

  if(0x01 | FFlag_G_H ) //Verifica si las banderas están en cero
  {
    // se corrobora que ya hubo recuperación de los
límites
    if ( 0x02 | FFlag_G_H)
    {
//*****
// Verificación si el voltaje esta muy bajo
    if( 0x04 | FFlag_G_H) //Verifica si la bandera de elevación está
activa
    {
      if(VAC <=330) // Si está por debajo de los 85 hay que elevarlo
      {
        FFlag_G_H |= 0x04; // Bandera de elevación 1
        P2OUT &=~ 0x07; //0111 Los 3 están normalmente cerrados 25%

Flag_Time &=~0x01; //retardo
        while(!(0x01 & Flag_Time));

//activa relevador elevación 1
      }
    }
  }
```

```
// verifica si ya recuperó el 1er CAMBIO
if( 0x04 & FFlag_G_H) //bandera 04 activa elevación 1
{
    if(VAC >= 349 ) //Si está por arriba de 400 ya recuperó
    {
        FFlag_G_H &=~ 0x04; // Bandera de elevación 1
P2OUT |= 0x04; //0100 15%
        P2OUT &=~ 0x03;
        Flag_Time &=~0x01; //retardo
while(!(0x01 & Flag_Time));

//desactiva relevador elevación 1
    }
}

//*****
// Verificación si el voltaje está bajo
if( 0x04 | FFlag_G_H) //NO entra si está en Elevación 1
{
    if(0x08 | FFlag_G_H) // Verifica si la bandera elevación 2 activa
    {
        if( VAC > 349 && VAC <= 405) // Si esta por debajo de los 100
hay que elevarlo
        {
            FFlag_G_H |= 0x08; // Bandera de elevación 2
            P2OUT |= 0x04; //0100 15%
            P2OUT &=~ 0x03;

            //activa relevador elevación 1
        }
    }
}

// verifica si ya recuperó 2do CAMBIO
if( 0x08 & FFlag_G_H) //bandera 04 activa elevación 1
{
    if(VAC >= 421 ) //Si está por arriba de 110 ya recuperó
```



```
    {
        FFlag_G_H &=~ 0x08; // Bandera de elevación 1
        P2OUT |= 0x05; //0101
        P2OUT &=~ 0x02; //0101

        //desactiva relevador elevación 1
    }
}
}

//*****

//*****
// Verificación relación 1:1
if( 0x08 | FFlag_G_H) //
{
    if(0x10 | FFlag_G_H) //
    {
        if( VAC > 421 && VAC <=481) //relación 1:1 si sobrepasa reducir
        {
            FFlag_G_H |= 0x10; // Bandera de relación 1:1
            P2OUT |= 0x05; //0101
            P2OUT &=~ 0x02; //0101
            //activa relevador elevación 1
        }
    }
}

// verifica si ya recupero 2do CAMBIO
if( 0x10 & FFlag_G_H) //bandera 04 activa elevación 1
{
    if(VAC >= 507 ) //Si está por arriba de 110 ya recuperó
    {
        FFlag_G_H &=~ 0x10; // Bandera de elevación 1
        P2OUT |= 0x07; //0111
        //desactiva relevador elevación 1
    }
}
}
```



```
        Flag_Ret |= 0x01;
        P2OUT &=~0x10; //apagó relevador de salida

    }
    if(VAC >550)//límite superior
    {
        FFlag_G_H |= 0x80; //Señal para desactivar relevador
        FFlag_G_H &=~ 0x02; // Corte por ALTO Voltaje
        Flag_Ret |= 0x01;
        P2OUT &=~0x10; //apagó relevador de salida

    }
}
}
```

## APENDICE D

El código del programa núcleo que se que se ejecuta todo el tiempo (kernel)

```
#pragma vector=TIMERAO_VECTOR
__interrupt void Timer_A(void)
{
    //Necesito que cuente cuando sea requerido, mientras no
    Cont_Time1++;
    FlagInt ^= 0x02;
    if (Cont_Time1>=2) //indica 100ms
    {
        Flag_Time |= 0x80; //Bandera de Control de tiempo del Kernel
        Cont_Time1=0;
        Cont_Time2++;
        Flag_Time |= 0x01;
        Flag_Time |= 0x80; //Bandera de Control de tiempo del Kernel
    }

    if( Cont_Time2 >=5) //indica 500ms
    {
        Cont_Time2=0;
        Cont_Time3++;
        Flag_Time |= 0x02; //Bandera que indica tiempos
    }

    if( Cont_Time3 >=2) //1 seg
    {
        Cont_Time3=0;
        Cont_Time4++;
        Flag_Time |= 0x04; //Bandera que indica tiempos
    }

    if( Cont_Time4 >=5) //5 seg
    {
        Cont_Time4=0;
    }
}
```

```
Cont_Time5++;
Flag_Time |= 0x08;    //Bandera que indica tiempos

}
if( Cont_Time5 >=12) //1min
{
Cont_Time5=0;
Cont_Time6++;
Flag_Time |= 0x10;    //Bandera que indica tiempos
}

if( Cont_Time6 >=5) //5min
{
Cont_Time6=0;
Cont_Time7++;
Flag_Time |= 0x20;    //Bandera que indica tiempos
}

if( Cont_Time7 >=6) //1hora //
{
Cont_Time7=0;
Flag_Time |= 0x40;    //Bandera que indica tiempos
}
```

## BIBLIOGRAFÍA

Título	Autor	Editorial	Año
<b>Handbook of Modern Sensors Fourth Edition</b>	Jacob Fraden	Springer.	2010
<b>Practical controls: A guide to Mechanical Systems 4ta Edición</b>	Steven R. Calabrese	The Fairmont Press, Inc	2003
<b>Handbook of air conditioning and refrigeration</b>	Shan K. Wang	Mc Graw hill	2000
<b>Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control</b>	Dogan Ibrahim	Elsevier Science & Technology Books	2002
<b>Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones</b>	Rashid Muhammad H.	Prentice-Hall Hispanoamericana	1993

### Referencias

<http://www.ti.com>

<http://www.isbmex.com/xtreguladores.html>

<http://www.deesa.com.mx/preguntas.html>

<http://www.uclm.es/area/gsee/aie/maquinaselectricas/trafo.pdf>

<http://es.scribd.com/doc/6323484/Transform->

<http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador.htm>

<http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/autotrafos.pdf>

<http://www.nichese.com/trans-auto.html>

Consultado en:

<http://www3.fi.mdp.edu.ar/maquinas->

[electricas/Teorias%20PDF/MEI/PDF%20Presentaciones%20en%20Impress%20\(.odp\)/T06-%20Autotransformador.pdf](http://www3.fi.mdp.edu.ar/maquinas-electricas/Teorias%20PDF/MEI/PDF%20Presentaciones%20en%20Impress%20(.odp)/T06-%20Autotransformador.pdf)

Consultado en:

<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/circuitos-magneticos-y-transformadores/temas/tema-4-transformadores-trifasicos>

<http://hgm.shibanazihuatanejo.com/ME/Notascurso/U4.pdf>

<http://www.mikroe.com/chapters/view/84/libro-de-la-programacion-de-los-microcontroladores-pic-en-basic-capitulo-1-mundo-de-los-microcontroladores/#c1v3>

<http://www.mikroe.com/chapters/view/79/capitulo-1-el-mundo-de-los-microcontroladores/>

<http://www.mikroe.com/chapters/view/80/capitulo-2-programacion-de-los-microcontroladores/>