

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA
PROGRAMABLE PARA UNA MÁQUINA EXTRUSORA**

ROCÍO SANTIAGO SÁNCHEZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTA DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2007**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE
TEMPERATURA PROGRAMABLE PARA UNA MÁQUINA EXTRUSORA**

ROCÍO SANTIAGO SÁNCHEZ

**Trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial presentado como
requisito parcial para optar el título de Ingeniera Física**

**Director
RUBIEL VARGAS CAÑAS
Ingeniero de sistemas**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTA DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2007**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Director **Prof. RUBIEL VARGAS CAÑAS**

Jurado **Prof. GILBERTO BOLAÑOS**

Jurado **Prof. MARIO MILVER PATIÑO**

Fecha de sustentación: Popayán, 2 de marzo de 2007

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	7
1. EXTRUSIÓN DE POLÍMERO.....	12
1.1 CONSTITUCIÓN DE UNA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN	14
1.1.1 La tolva de alimentación	14
1.1.2 El tornillo de extrusión.....	15
1.1.2.1 Zona de transporte	15
1.1.2.2 Zona de fusión	16
1.1.2.3 Zona de dosificación	17
1.1.3 Cilindro ó barril.....	18
1.1.4 El cabezal	19
1.1.4.1 Plato rompedor y filtros	19
1.1.4.2 Torpedo	19
1.1.4.3 Boquilla	20
1.1.4.4 Adaptadores	21
1.1.5 El motor	21
1.2 PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN	22
1.2.1 Temperatura de extrusión.....	22
1.2.2 Velocidad de extrusión	23
2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONTROL.....	24
2.1 ACCIONES DE CONTROL	24
2.2 CONTROLADOR AUTOMÁTICO, ACTUADOR Y SENSOR.....	25
2.3 ACCIÓN DE CONTROL DE DOS POSICIONES O DE ENCENDIDO Y APAGADO (ON/OFF)	26
2.4 BRECHA DIFERENCIAL	29
3. CALOR Y TEMPERATURA	31

3.1 CALOR	31
3.1.1 Conducción	31
3.1.2 Convección	32
3.1.3 Radiación	33
3.2 EFECTO JOULE	33
3.3 TEMPERATURA	35
3.3.1 Medida de temperatura	35
3.3.1.1 Termopares	35
3.3.1.2 Resistivos	35
3.3.1.3 Semiconductores	36
3.3.2 La termocupla como sensor de temperatura	36
3.3.3 Acondicionamiento de señal para una termocupla	40
4. CONTROLADOR DE TEMPERATURA	43
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	43
4.2 FUNCIÓN DEL CONTROLADOR	45
4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR	47
4.3.1 Sensado y acondicionamiento de señal	47
4.3.1.1 Circuito de alarma para las termocuplas	50
4.3.2 Programación del microcontrolador	51
4.3.2.1 Adaptación de una pantalla LCD a un microcontrolador .	52
4.3.2.2 Adaptación de un teclado matricial a un microcontrolador	54
4.3.3 Interfaz de usuario	55
4.3.3.1 Funcionamiento del teclado	56
4.3.3.2 Funcionamiento de la pantalla LCD	56
4.3.3.3 Funcionamiento del botón de reset	58
4.3.4 Sistema respuesta de potencia	58
4.3.4.1 Principio de funcionamiento del módulo de potencia	61
4.4 REALIZACIÓN PRÁCTICA	62
4.5 PRUEBAS DE CAMPO	67

CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS	74

LISTA DE GRÁFICAS

Figura 1.1 Esquema de una extrusora monotornillo. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 1.2 Esquema de un tornillo simple de extrusión. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 1.3 Inicio del proceso de fusión del polímero en el extrusor. (a) Cara delantera del filete del tornillo. (b) Área de transición (plástico fundido y no fundido). (c) Plástico fundido por conducción y fricción. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 1.4 Esquema de un torpedo de un cabezal de extrusión de película tubular. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 1.5 Sección de una boquilla circular de extrusión. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 2.1 Diagrama en bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 2.2 Posición de la válvula contra temperatura medida. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 2.3 (a) Temperatura medida real contra tiempo. (b) Apertura de la válvula contra tiempo. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 2.4 Brecha diferencial en el control de encendido-apagado. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.1 Curva característica de los termopares tipo c, e, j, k, r, s y t
..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.2 Efecto seebek. Calentado la juntura de dos materiales distintos a y b que componen un circuito cerrado, se establece una corriente i...... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.3 Ley de temperaturas intermedias. La corriente medida en las dos figuras es la misma...... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.4 (a) Junta de referencia (b) Junta fría (c) Junta de medición
..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.5 (a) Esquema de una termocupla y su sistema de medición: 1. Junta de medición. 2. Junta de corrección. 3. Cable compensado. 4. Junta de referencia. (b) Sistema electrónico de compensación de junta de referencia: 1. Termocupla. 2. Cable compensado. 3. Compensador de milivoltios. 4. Fuente de tensión constante.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 3.6 Linealización de la señal vin se utiliza un diodo en el bucle de realimentación de un amplificador operacional.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.1 Diagrama en bloques del controlador. Se representa la zona de control. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.2 Diagrama del controlador de temperatura conectado a la máquina extrusora. Se representa la zona de control...... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.3 Integrado ad595. Diagrama funcional¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.4 Circuito de alarma para determinar ruptura o desconexión de una termocupla..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.5 Conexión del módulo LCD con el pic16f877iERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.6 Conexión del teclado matricial con el pic16f877iERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.7 Pantalla LCD de dos líneas. Interfaz de usuario.iERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.8 Módulo de potencia.....iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.9 Controlador de temperatura. Tarjeta principal.....iERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.10 Controlador de temperatura. Diseño interior: (a) Tarjeta principal. (b) Etapa de potencia. (c) Conectores de sensores. (d) Termocupla tipo k.....iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.11 Controlador de temperatura programable para una máquina extrusora de plástico.....iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.12 Controlador de temperatura programable visto desde diferentes ángulos.....iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.13 Montaje experimental para la primera prueba. (a) Resistencia eléctrica conectada a 220VAC. (b) Termómetro digital comercial. (c) Controlador de temperatura programable para una extrusora.....iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.14 Montaje experimental para la segunda prueba. (a) Controlador de temperatura programable para una extrusora. (b) Resistencia eléctrica conectada a 220 VAC. (c) Pinza amperimétrica.iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Figura 4.15 Conexión de una resistencia al controlador de temperatura.iERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Tipos de termopares ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Tabla 4.1 Descripción de pines de la pantalla LCD ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Tabla 4.2 Interfaz de usuario: mensajes visualizados en la pantalla LCD ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

INTRODUCCIÓN

La transformación de los materiales plásticos es un campo tecnológico caracterizado por un dinámico, casi vertiginoso desarrollo; no sólo en lo concerniente a las materias primas, en donde día a día surgen nuevos materiales con mejores características de empleo, sino en los equipos de proceso que se tornan cada vez más eficientes y sofisticados.

Para cualquier empresa del sector del plástico que desee alcanzar y mantener una posición competitiva dentro del mercado de productos plásticos, es absolutamente indispensable disponer de mecanismos que le permitan asimilar el continuo avance tecnológico de los últimos tiempos.

Por ello y con miras a fomentar procesos de revisión y control que favorezcan la productividad y la rentabilidad de una empresa transformadora de resinas, a continuación se presenta el informe de la práctica empresarial dirigida a diseñar y construir un control automático destinado a regular la temperatura en una máquina extrusora de plástico, perteneciente a la microempresa Mangueras Súper, ubicada en la zona industrial de la ciudad de Popayán.

1. EXTRUSIÓN DE POLÍMERO

La extrusión de polímero es un proceso industrial mediante el cual se convierte la materia prima en un producto de sección transversal uniforme. Consiste en calentar el material plástico y forzarlo a pasar por un orificio moldeador (matriz). Este método se puede usar con los termoplásticos tales como el PVC y el polietileno [1].

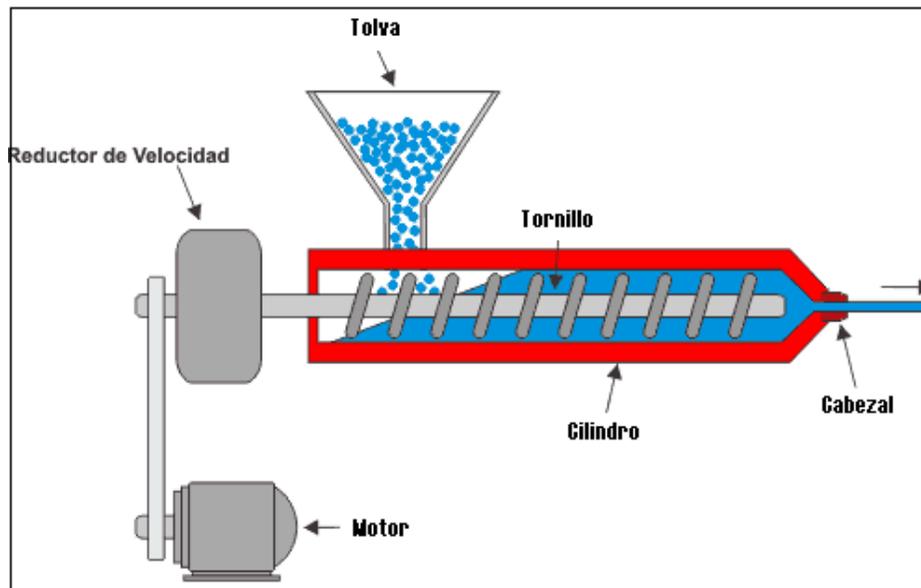
En el proceso de extrusión la materia prima se somete a fusión, transporte, presión, deformación y debe ser preparada previamente antes de ingresar a la máquina extrusora, es decir que se debe mezclar la resina plástica y los diversos aditivos mediante un sistema de máquina denominado formuladora, de esa manera se le da al producto final las propiedades deseadas. A la formuladora ingresan pequeños lotes de alimentación denominados cargas. La carga es la unidad de alimentación de la formuladora, en la cual se encuentran los componentes de la materia prima (15.97 kg. de aditivos por cada 100 kg. de resina-PVC.), a esta mezcla se le conoce con el nombre de formulado.

La materia prima que ingresa por lotes o cargas es colocada en la tolva de la maquina extrusora (figura1.1), la cámara de calor de la máquina (cilindro) es calentada y así los gránulos se derriten. Un dispositivo en forma de tornillo (husillo) en el centro de esta cámara gira impulsado por un motor eléctrico, obligando al plástico a salir expulsado por la matriz, diseñada de tal manera que el material adquiere una forma determinada. Las líneas de producción son generalmente de tipo multiproducto, por la gran variedad de cabezales (matrices) posibles de

utilizar. Por ejemplo, para hacer películas la matriz es una ranura larga, para hacer tubería el plástico es comprimido entre la matriz y una varilla en su centro (hembra y macho), siendo la matriz hembra la que le proporciona el diámetro y la matriz macho el espesor de la tubería. Cuando el material sale de la cámara de calor, sale caliente y perdería su forma sino se enfriase rápidamente. Esta operación de enfriamiento es realizada en la cámara siguiente denominada "tina de enfriamiento", en ella la tubería es bañada con un continuo chorro de agua lo suficientemente fría.

En el siguiente esquema se presentan los elementos más importantes de una extrusora de resinas.

Figura 1.1 Esquema de una extrusora monotornillo.



1.1 CONSTITUCIÓN DE UNA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN

El extrusor en términos generales resulta un equipo de transformación, responsable del transporte, la compactación, la fusión, el mezclado, la plastificación y el conformado de las resinas plásticas en él procesadas; además, debe desarrollar la presión suficiente para superar la resistencia al flujo de la hilera abierta, de modo que el perfil emerja de la hilera de forma continua.

Entre los diferentes tipos de extrusoras, las de tornillo (extrusoras continuas) resultan las más frecuentemente utilizadas. Estas se encuentran constituidas por uno o múltiples tornillos, según los requerimientos propios del proceso [1].

Las partes de una máquina de extrusión se mencionan a continuación:

1.1.1 La tolva de alimentación Es el reservorio encargado de la alimentación de la resina a la extrusora. Aunque muy sencillo su diseño, este resulta de suma importancia; la tolva es el componente de la línea de extrusión de mayor simpleza, pero no por esto su diseño debe menospreciarse. La fase de alimentación repercute directamente en la efectividad del proceso. Una alimentación inapropiada puede ocasionar mermas en la productividad de la línea, generadas por inestabilidades en el flujo. Generalmente, el volumen de la tolva debe ser proporcional a la capacidad de producción de la extrusora, garantizando en todo momento una alimentación constante.

1.1.2 El tornillo de extrusión Es el elemento mecánico responsable de las operaciones de transporte, fusión y bombeo o dosificación de la resina. El tornillo de extrusión puede seccionarse como se ilustra en la figura 1.2:

Figura 1.2 Esquema de un tornillo simple de extrusión.



1.1.2.1 Zona de transporte Buscando maximizar la alimentación de resina a la extrusora y con ello su productividad, el diseño de los tornillos de extrusión presenta en la zona de transporte la mayor profundidad de canal (mayor volumen). Uno de los requerimientos más importantes que debe satisfacer todo tornillo de extrusión en la zona de alimentación es tener una superficie sumamente lisa e incluso pulida, de ser necesario, pues de esta manera se favorece la adhesión de la resina a la superficie del barril o cilindro de la extrusora y no al tornillo, permitiendo así un transporte de resina más eficiente.

En la medida que el material avanza a lo largo de la zona de alimentación, comienza a ser compactado y calentado. Dos mecanismos son responsables de este calentamiento. El primero de ellos es debido a los efectos de fricción, mientras que el segundo es debido a la conducción de calor desde las bandas de calentamiento del barril. Se ha determinado que de un 70 a un 80% del calor transmitido al polímero

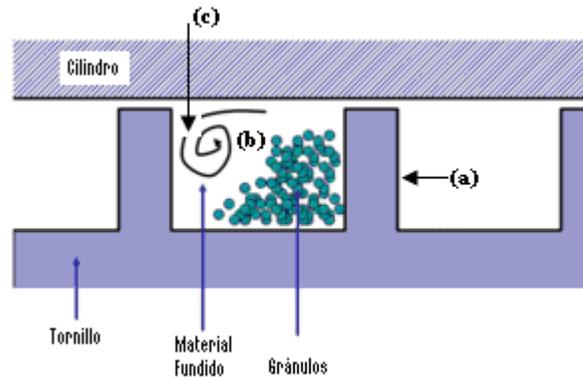
proviene de los efectos de fricción por conversión de la energía mecánica en calor [1].

1.1.2.2 Zona de fusión El inicio de la fusión evidencia el paso de la resina a la segunda zona del tornillo de extrusión (zona de fusión). Debido a que durante la fusión del material se produce un incremento de su densidad aparente, (producto de la reducción de los intersticios entre partículas sólidas presentes), en la zona de fusión el tornillo presenta una progresiva reducción del canal (menor volumen). Generalmente el inicio de la fusión ocurre a poca distancia de la tolva y se extiende hasta aproximadamente el 60% de la longitud de la extrusora [1].

El polímero se funde por acción mecánica en combinación con la elevación de su temperatura por medio de calentamiento del cilindro. La acción mecánica incluye los esfuerzos de corte y el arrastre, que empuja el polímero hacia la boquilla e implica un incremento en la presión.

La primera fusión que se presenta en el sistema ocurre en la pared interna del cilindro (ver figura 1.3), en forma de una delgada película, resultado del incremento en la temperatura del material y posteriormente también debida a la fricción. Cuando esta película crece, es desprendida de la pared del cilindro por el giro del husillo, en un movimiento de ida y vuelta y luego un barrido, formando un patrón semejante a un remolino sin perder el arrastre final. Esto continúa hasta que se funde todo el polímero [1].

Figura 1.3 Inicio del proceso de fusión del polímero en el extrusor. (a) Cara delantera del filete del tornillo. (b) Área de transición (plástico fundido y no fundido). (c) Plástico fundido por conducción y fricción.



Si el material se adhiere al husillo y resbala sobre la pared del cañón, entonces el arrastre es cero, y el material gira con el husillo. Si en cambio, el material no resbala con la pared del cañón y resbala con el husillo, entonces el arrastre es máximo y el transporte de material ocurre.

En la realidad el polímero experimenta fricción tanto en la pared del cañón como en el husillo, las fuerzas de fricción determinan el arrastre que sufrirá el polímero.

1.1.2.3 Zona de dosificación El diseño del tornillo en la zona de bombeo debe garantizar, además de un buen mezclado, la generación de la presión necesaria para que la masa líquida de polímero pueda atravesar las restricciones del cabezal y la boquilla, a una velocidad constante. Generalmente la zona de dosificación o bombeo tiene un volumen de canal constante. El creciente desarrollo de la tecnología de transformación de los polímeros ha permitido la presencia de diferentes dispositivos que favorecen el mezclado homogéneo. Estos dispositivos

suelen tener diseños dirigidos a permitir modificar el frente de flujo del polímero que se desplaza por el canal del tornillo, promoviendo su mezcla. El mecanismo más frecuentemente utilizado se basa en la interrupción del filete del tornillo e incluso mediante la desaparición total del mismo.

1.1.3 Cilindro ó barril El barril o exterior de la extrusora es un cilindro metálico que conforma, junto con el tornillo de extrusión, la cámara de fusión y bombeo de la extrusora. En pocas palabras es la carcaza que envuelve al tornillo.

En el diseño de todo cilindro de extrusión se busca:

- 1) Máxima durabilidad.
- 2) Alta transferencia de calor.
- 3) Mínimo cambio dimensional con la temperatura

El calentamiento del cilindro se produce, casi exclusivamente, mediante resistencias eléctricas. El sistema de calentamiento de la extrusora es responsable de suministrar entre un 20-30% del calor necesario para fundir la resina [1].

Aunque pueda lucir contradictorio, cada zona de calentamiento del tornillo de la extrusora está acompañada, en la mayor parte de los equipos comerciales, de un controlador de temperatura que comanda la operación de los calefactores eléctricos, los cuales entran en operación cuando la temperatura de una zona supera el punto prefijado, por efecto de:

- a. La transferencia excesiva de calor por parte de la resistencia
- b. La generación excesiva de calor por parte de los elementos de mezclado presentes en el tornillo de la extrusora.

La temperatura de extrusión puede ser controlada mediante la acción de los controles de temperatura presentes en cada zona de la extrusora.

1.1.4 El cabezal El componente de la línea denominado cabezal, es el responsable de conformar o proporcionar la forma del extrusado.

De forma detallada, los principales componentes de un cabezal para la extrusión son:

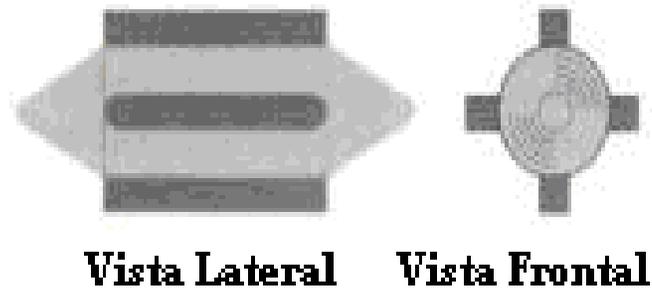
1.1.4.1 Plato rompedor y filtros Constituyen el punto de transición entre la extrusora y el cabezal. A estos componentes les corresponde una parte importante de la calidad del material extrusado. El plato rompedor es el primer elemento del cabezal destinado a romper con el patrón de flujo en espiral que el tornillo imparte, mientras que la función de los filtros es la de eliminar del extrusado partículas y/o grumos provenientes de impurezas, carbonización, pigmentos y/o aditivos, etc.

En lo que respecta a su diseño, el plato rompedor no es más que una placa cilíndrica horadada. Por otro lado, las mallas deben ser fabricadas con acero inoxidable, ya que las compuestas con cobre o bronce tienen un efecto catalítico sobre las reacciones termo-oxidativas.

1.1.4.2 Torpedo Algunos cabezales de extrusión suelen presentar en el ducto de acople entre la extrusora y el cabezal, un elemento que

contribuye con la función del plato rompedor (modificar el patrón de flujo en espiral a uno longitudinal). Por su geometría, a este dispositivo se le suele denominar torpedo (ver figura 1.4).

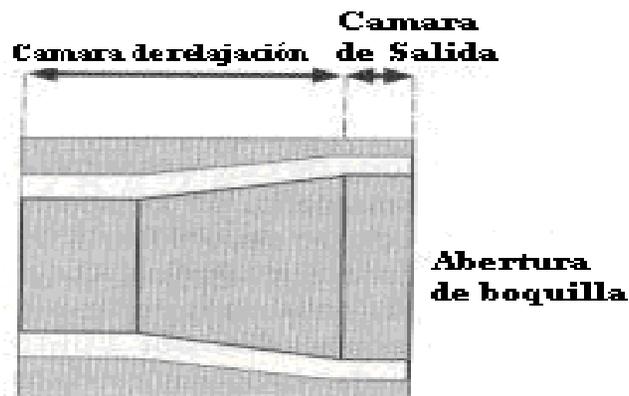
Figura 1.4 Esquema de un torpedo de un cabezal de extrusión de película tubular.



1.1.4.3 Boquilla La boquilla de extrusión es el componente del cabezal encargado de la conformación final del extrusado. Se debe velar por que el polímero fluya, con volumen y velocidad de flujo uniforme, alrededor de toda la circunferencia de la boquilla, de manera que se logren espesores uniformes. Los diseños actuales de boquillas presentan dos secciones claramente definidas (ver figura 1.5). La primera de estas secciones es conocida como cámara de relajación, mientras que la segunda puede ser llamada cámara de salida. La cámara de relajación de la boquilla tiene como propósito producir la desaceleración del material e incrementar el tiempo de residencia del material en la boquilla, de manera tal que el polímero relaje los esfuerzos impartidos por el paso a través de los paquetes de filtros y el plato rompedor. La

cámara de descarga produce el formado del perfil deseado con las dimensiones requeridas.

Figura 1.5 Sección de una boquilla circular de extrusión.



Los parámetros básicos para la especificación de una boquilla son: el diámetro y la abertura de la salida.

1.1.4.4 Adaptadores Son requeridos cuando la boquilla no es diseñada específicamente para un determinado extrusor. Debido a que los fabricantes de extrusoras y boquillas no siempre son los mismos, el uso de adaptadores suele ser común para adaptar diversas boquillas a la máquina.

1.1.5 El motor El motor de la extrusora es el componente del equipo responsable de suministrar la energía necesaria para producir la alimentación de la resina, parte de su fusión (70 a 80%), su transporte y el bombeo a través del cabezal y la boquilla.

Los motores incorporados en las líneas de extrusión son eléctricos y operan con voltajes de 220 y 440 V. Las extrusoras modernas emplean

motores DC, ya que permiten un amplio rango de velocidades de giro, bajo nivel de ruido y un preciso control de la velocidad. Se recomienda que la potencia de diseño sea de 1 HP por cada 10 a 15 lb/h de caudal, sin embargo para las aplicaciones de alto requerimiento de mezclado esta relación puede llegar a ser de 1HP por cada 3 a 5 lb/h [1].

1.2 PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Los principales parámetros para el control del proceso de extrusión son:

- Temperatura de extrusión.
- Velocidad de extrusión o caudal.

La eficiencia del proceso depende de una selección cuidadosa de temperaturas y velocidades de línea [1].

1.2.1 Temperatura de extrusión El principal efecto de la modificación de la temperatura de extrusión es la viscosidad del polímero (su resistencia al flujo). La selección de la temperatura de extrusión debe hacerse de manera tal que permita reducir el consumo de potencia del motor de la extrusora a valores tales que estén en el intervalo de trabajo del equipo y, adicional mente, se alcance una viscosidad del polímero adecuada para su procesamiento. La temperatura óptima de extrusión de cada resina dependerá de su distribución de pesos moleculares, representado desde el punto de vista reológico por su viscosidad [1].

Los efectos de la temperatura de extrusión se observan más allá de la salida de la boquilla. Los principales efectos de la temperatura de extrusión resultan reflejados en las características de la superficie del

material extrusado y el grado de cristalización del mismo. Una de las propiedades mas afectada por la modificación de la temperatura de extrusión es la resistencia al impacto en los productos [1].

1.2.2 Velocidad de extrusión. Generalmente en los procesos de extrusión el objetivo de la optimización de las variables de procesamiento es el logro del máximo caudal (Kg. de resina procesada por unidad de tiempo) que permita la obtención de un producto de alta calidad.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONTROL

El control automático es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso.

Debido a que los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, aligerar la carga de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades, casi todos los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo [2].

2.1 ACCIONES DE CONTROL

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

- De dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)
- Proporcionales
- Integrales
- Proporcionales-integrales
- Proporcionales-derivativos
- Proporcionales-integrales-derivativos

Los controladores también pueden clasificarse, de acuerdo con el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño [2].

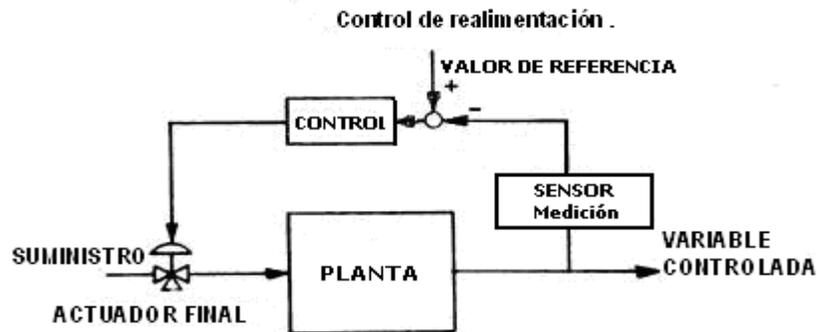
2.2 CONTROLADOR AUTOMÁTICO, ACTUADOR Y SENSOR

La figura 2.1 es un diagrama en bloques de un sistema de control industrial que consiste en un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición). El trabajo del controlador automático es controlar la medición. "Controlar" significa mantener la medición dentro de límites aceptables. La salida de un controlador se alimenta a un actuador, tal como un motor o una válvula neumática, un motor hidráulico, o un motor eléctrico. (El actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de referencia suministrada) [2].

El sensor, o elemento de medición, es un dispositivo capaz de recibir una señal o estímulo tal como un desplazamiento, una presión, una temperatura y lo convierte en otra variable manejable (un voltaje ó una corriente), que pueda usarse para comparar la señal de salida de la planta con la señal de referencia suministrada. Este elemento está en la trayectoria de realimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con

las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o elemento de medición [2].

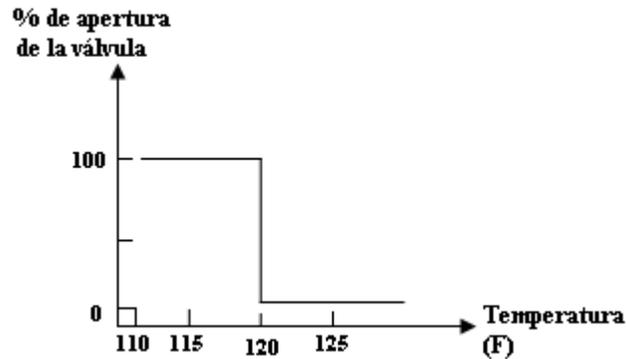
Figura 2.1 Diagrama en bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor [2].



2.3 ACCIÓN DE CONTROL DE DOS POSICIONES O DE ENCENDIDO Y APAGADO (ON/OFF)

En el modo de control de encendido-apagado, el actuador solo tiene dos posiciones, estados de operación. Cuando la señal se encuentra por encima del umbral establecido (set point), el controlador envía al actuador a la otra posición. Para entender mejor el control encendido-apagado, considérese como dispositivo actuador una válvula operada por un selenoide (un selenoide es un arrollamiento de alambre conductor, que produce mediante el paso de corriente un campo magnético), al ser accionada por un selenoide solo tiene dos posiciones posibles: abierto o cerrado, no hay posiciones intermedias. En la figura 2.2 se muestra la posición del actuador para un control encendido-apagado [3].

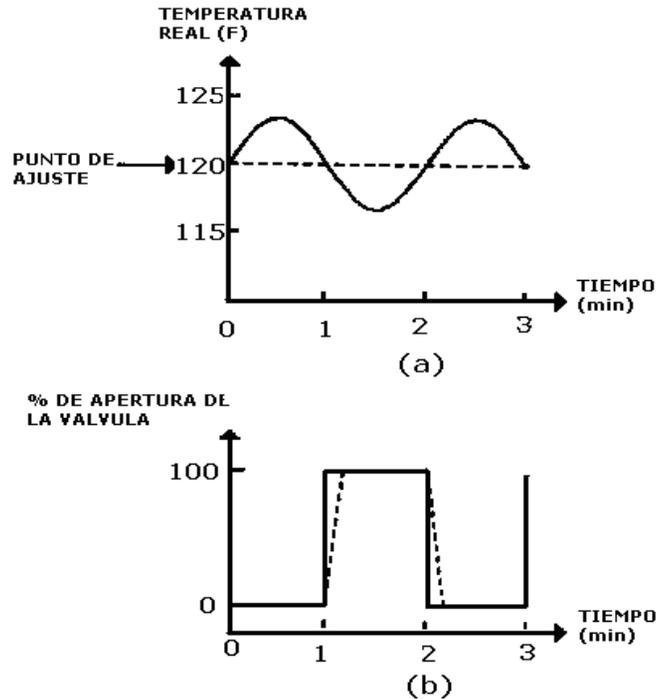
Figura 2.2 Posición de la válvula contra temperatura medida [3]



En la figura anterior se considera como variable controlada la temperatura, con un set point de 120⁰F. Si el valor de la temperatura es menor de 120⁰F, la válvula es posicionada a la máxima abertura (100%). Si el valor de la temperatura es mayor que 120⁰F, la válvula es posicionada a la mínima abertura (0%).

La figura 2.3 muestra una gráfica del valor de la temperatura contra tiempo, con la posición de la válvula graficada en el mismo eje de tiempo. Se puede observar como la temperatura oscila alrededor del punto de ajuste, esta es una característica del control encendido-apagado [3].

Figura 2.3 (a) Temperatura medida real contra tiempo. (b) Apertura de la válvula contra tiempo [3].



La oscilación ocurre por que la planta no puede responder instantáneamente a los cambios de posición de la válvula. Cuando la temperatura se incrementa, es por que la razón de entrada de calor es mayor que la razón de pérdida de calor en el proceso (planta). El cierre rápido de la válvula de control no puede revertir instantáneamente esa tendencia, por que habrá una energía calorífica residual acumulada en y alrededor del dispositivo de calentamiento que debe difundirse a través de la cámara de proceso. A medida que este calor residual es distribuido, temporalmente continúa aumentando la temperatura [3].

De la misma manera una tendencia a la baja temperatura no puede revertirse instantáneamente, pues lleva un rato distribuir la nueva energía calorífica a través del proceso. Hasta que pueda ocurrir la

distribución, la tendencia a la baja continuará, causando una oscilación [3].

La amplitud de la señal depende de la rapidez con que la señal de medición cambia durante cada ciclo. En procesos de gran capacidad, tales como cubas de calentamiento, la gran capacidad produce una gran constante de tiempo, por lo tanto, la medición puede cambiar sólo muy lentamente. El resultado es que el ciclo ocurre dentro de una banda muy estrecha alrededor del valor de referencia, y este tipo de control puede ser muy aceptable.

2.4 BRECHA DIFERENCIAL

La brecha diferencial esta definida como un rango de valores que debe pasar la variable medida, para que el actuador cambie de posición. En pocas palabras la brecha diferencial nos dice cuanto debe pasar el valor medido por encima del set point para cerrar la válvula y cuanto por debajo del set point debe caer la variable medida para abrir la válvula[3].

Por ejemplo, la figura 2.4 muestra como la temperatura real debe subir 3⁰F por encima del set point para cerrar la válvula y debe bajar 3⁰F para abrir la válvula. El menor cambio de temperatura posible en el cual puede operar la válvula de abierto a cerrado es 6⁰F. La brecha diferencial es entonces de 6⁰F.

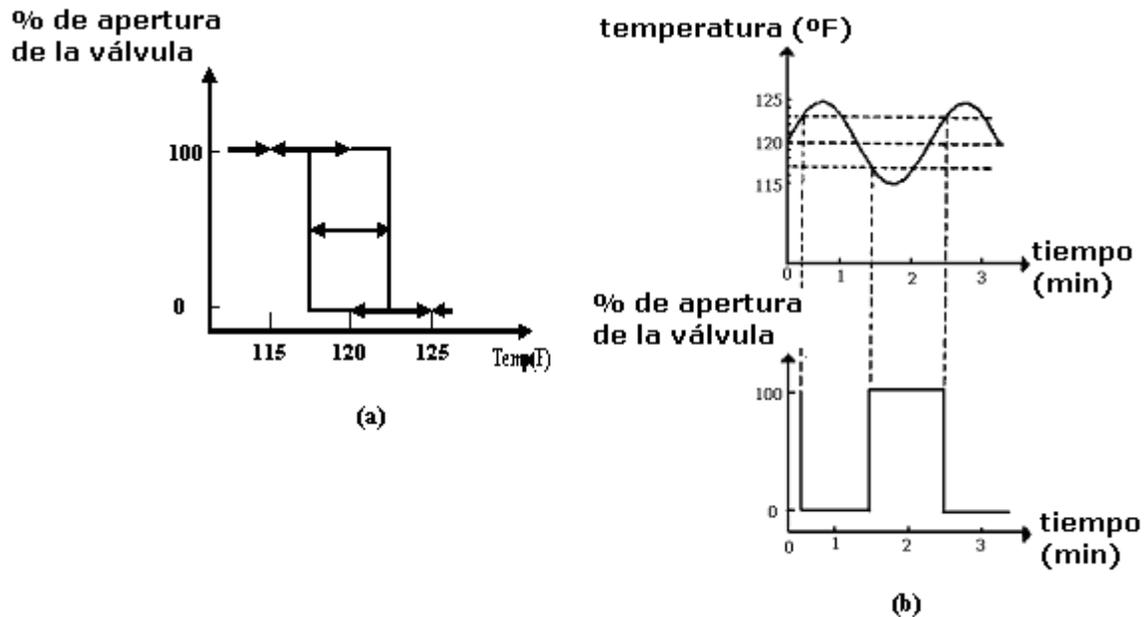
La brecha diferencial también puede expresarse como un porcentaje del rango completo del controlador. Si el controlador tiene un rango de, por ejemplo, 60⁰F a 300⁰F, entonces el tamaño de su rango es de 240⁰F (300⁰F-60⁰F). Una temperatura de 6⁰F representa el 2.5% del rango completo de control,

$$6^{\circ}\text{F} / 240^{\circ}\text{F} = 0.025 = 2.5\% \quad (2.1)$$

Por tanto, en este caso la brecha diferencial puede expresarse como 2.5% en lugar de 6°F.

El efecto de la brecha diferencial se muestra en la gráfica de tiempo (figura 2.4b). Como puede verse, la magnitud de oscilación es mayor pero la frecuencia de oscilación es menor. Por tanto la brecha diferencial tiene sus pros y contras. Es negativa porque el valor instantáneo medido puede desviarse aún más del punto de ajuste, pero es positiva porque el desgaste del dispositivo corrector o actuador se reduce, aumentando su vida útil [3].

Figura 2.4 Brecha diferencial en el control de encendido-apagado [3].



3. CALOR Y TEMPERATURA

3.1 CALOR

El calor es la transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, en virtud de una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a una zona de menor temperatura (como resultado de la segunda ley de la termodinámica), con lo que eleva la temperatura de la segunda zona y reduce la de la primera, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante.

Este paso de energía térmica de un cuerpo caliente a uno menos caliente se denomina transferencia de calor y puede ocurrir principalmente a través de tres mecanismos, por conducción, convección o radiación. La transferencia de calor es un proceso tan complejo que la mayoría de las veces involucra más de un mecanismo de transferencia a la vez y aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos [4].

3.1.1 Conducción La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas basado en el contacto directo de sus partículas, que tienden a igualar su temperatura

o estado de excitación térmica. La conducción es la forma en que se transmite el calor en los cuerpos sólidos. Si se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumenta su vibración y chocan con las que rodean; estas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan, por esta razón, si el extremo de una varilla metálica se calienta una flama, transcurre cierto tiempo para que el calor llegue al otro extremo. El calor no se transmite con la misma facilidad por todos los cuerpos, se llaman buenos conductores de calor a aquellos materiales que permiten el paso de calor a través de ellos y malos conductores o aislantes son los que oponen mucha dificultad al paso del calor [4].

3.1.2 Convección Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos [4].

3.1.3 Radiación La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas [4].

3.2 EFECTO JOULE

El modelo más elemental de lo que sucede en un conductor real supone que las cargas móviles del conductor responden a la aplicación de un campo eléctrico externo E , acelerándose. Esta situación involucra una continua ganancia de energía cinética que es compensada por una pérdida equivalente de energía debida a las continuas interacciones que sufren las cargas móviles (generalmente electrones) en el interior del material conductor, ya sea con fonones o con imperfecciones de la red. Este continuo disipe de energía se hace en forma de calor, proceso al que se le denomina efecto joule, y explica porqué el paso de la corriente eléctrica a través de un material conductor está acompañado de una generación de calor. Este proceso simultaneo de aceleración debido al campo eléctrico y desaceleración debido a interacciones es equivalente a un movimiento promedio en el que la velocidad de los portadores de carga permanece constante [5].

La producción de calor por efecto Joule se puede describir a partir del modelo siguiente: se supone que un elemento de carga dq es parte de una corriente i que circula por un conductor en un instante de tiempo dt , por lo tanto

$$dq = i dt \quad (3.1)$$

El trabajo dw realizado por el campo sobre la carga se puede expresar mediante

$$dw = i v dt \quad (3.2)$$

donde v representa la diferencia de potencial a la que está sometido el conductor. En consecuencia, el ritmo temporal con el que se realiza este trabajo, esto es la potencia P disipada en forma de calor en la resistencia, vendrá dada por

$$P = dw/dt = i v \quad (3.3)$$

Asumiendo que la energía disipada se transforma exclusivamente en calor, se tiene que el calor generado Q_{gen} es igual al producto de la potencia por el intervalo de tiempo Δt que circula la corriente

$$Q_{gen} = i v \Delta t \quad (3.4)$$

Debido a que el elemento conductor es metálico se cumple la relación

$$V = r i \quad (3.5)$$

Conocida como ley de Ohm, donde r es la resistencia del material, y la ecuación se convierte en

$$Q_{gen} = r i^2 \Delta t \quad (3.6)$$

en esta ecuación se puede observar que controlando el intervalo de tiempo que circula la corriente por la resistencia es posible controlar la cantidad de calor que se produce.

3.3 TEMPERATURA

La temperatura es un parámetro termodinámico del estado de un sistema que caracteriza el calor, o transferencia de energía y depende de la energía cinética media de las moléculas de una sustancia; según la teoría cinética, la energía puede corresponder a movimientos rotacionales, vibracionales y traslacionales de las partículas de una sustancia. La temperatura, sin embargo, sólo depende del movimiento de traslación de las moléculas. En teoría, las moléculas de una sustancia no presentarían actividad traslacional alguna a la temperatura denominada cero absoluto [4].

3.3.1 Medida de temperatura Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en una aplicación de automatización, incluso en muchos casos en que el parámetro de interés no es la temperatura, ésta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada. La diversidad de sus aplicaciones ha condicionado igualmente una gran proliferación de dispositivos sensores, desde la sencilla unión bimetálica de los termostatos, hasta los dispositivos semiconductores más complejos. Los sensores de temperatura más utilizados industrialmente son [6]:

3.3.1.1 Termopares Los termopares utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto térmico, debido a sus distintos comportamientos eléctricos.

3.3.1.2 Resistivos Lo constituyen las RTD (Resistance Temperature Detector) o PT100 basadas en la dependencia de la resistividad de un

conductor con la temperatura, están caracterizadas por un coeficiente de resistividad positivo PTC (Positive Thermal Coefficient). También lo son las NTC (Negative Thermal Coefficient), que se llaman termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo.

3.3.1.3 Semiconductores Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente.

3.3.2 La termocupla como sensor de temperatura El uso de termopares en la industria se ha popularizado, ya que son altamente precisos y muchos más económicos que las termoresistencias. Además esta forma de medición abarca el rango de temperaturas requerido para la mayoría de las mediciones exigidas. Las termocuplas constituyen hoy en día el sistema de medición de temperatura más usado y de mejor acceso [6].

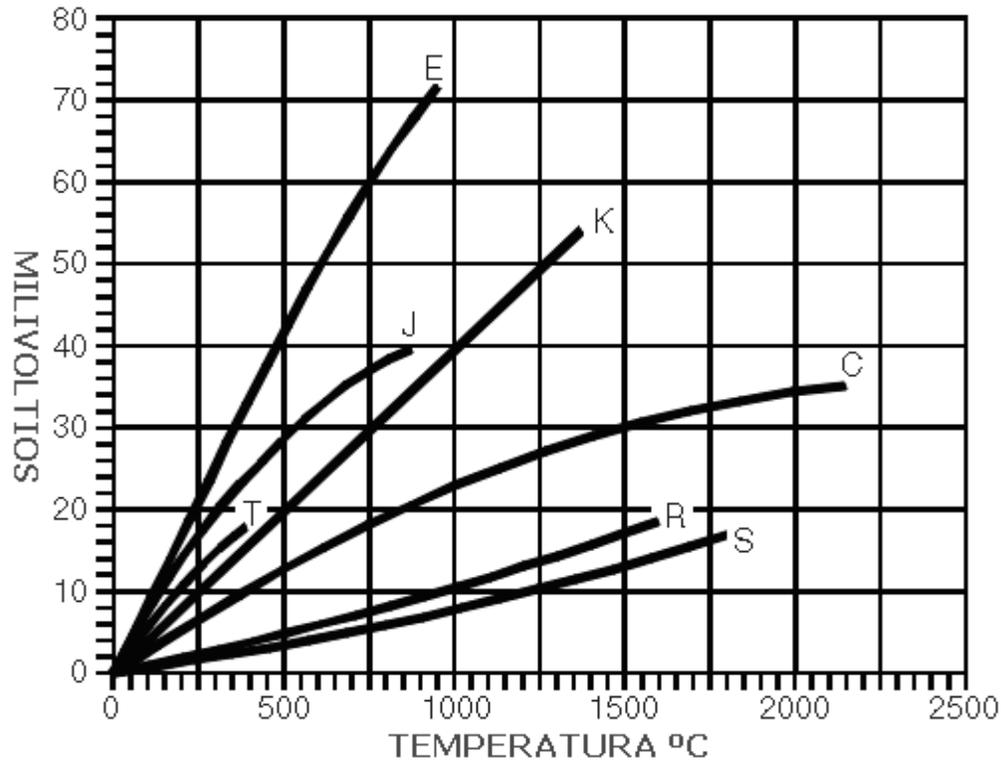
En la tabla siguiente se muestra los distintos tipos de termopares con su rango típico, su sensibilidad y la designación estándar.

Tabla 3.1 Tipos de Termopares [6].

Material de la unión	Rango típico °C	Sensibilidad $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Designación
Pt6%/Rodio - Pt(30%)/Rodio	38 a 1800	7.7	B
Tungsteno(5%)/Renio-Tungsteno(26%)/Renio	0 a 2300	16	C
Cromo- Constantan	0 a 982	76	E
Hierro - Constantan	0 a 760	55	J
Cromo - Aluminio	-184 a 1260	39	K
Pt(13%)/Rodio - Pt	0 a 1593	11.7	R
Pt(10%)/Rodio - Pt	0 a 1538	10.4	S
Cobre- Constantan	-184 a 400	45	T

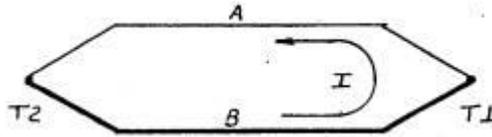
En la figura 3.1 se muestra la curva de algunos termopares con sus características eléctricas.

Figura 3.1 Curva característica de los termopares tipo C, E, J, K, R, S y T [6]



Si se presenta un gradiente de temperatura en un conductor eléctrico, el flujo de calor creará un movimiento de electrones y con ello se generará una fuerza electromotriz (FEM) en dicha región. La magnitud y dirección de la FEM serán dependientes de la magnitud y dirección del gradiente de temperatura del material que conforma al conductor. Las termocuplas se basan para su funcionamiento en el efecto SEEBEK:

Figura 3.2 Efecto SEEBEK. Calentado la junta de dos materiales distintos A y B que componen un circuito cerrado, se establece una corriente I .



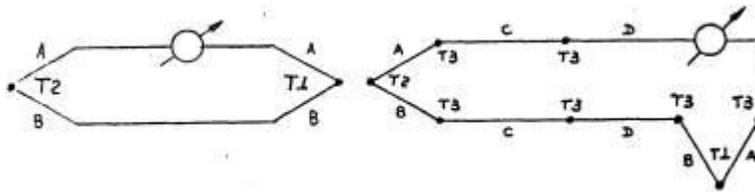
Una termocupla consiste en un par de conductores de diferentes metales o aleaciones. Uno de los extremos, la junta de medición, está colocado en el lugar donde se ha de medir la temperatura. Los dos conductores salen del área de medición y terminan en el otro extremo, la junta de referencia que se mantiene a temperatura constante. Se produce entonces una fuerza electromotriz que es función de la diferencia de temperatura entre las dos juntas [4].

Las leyes principales que rigen su funcionamiento son:

- 1) Ley de homogeneidad del circuito: no se puede obtener corriente calentando un solo metal (Efecto Thompson).
- 2) Ley de metales intermedios: la sumatoria de las diferencias de potencial térmicas es cero en un circuito con varios metales, si estos están a temperatura uniforme.
- 3) Ley de temperaturas intermedias: la fuerza electromotriz térmica de una termocupla no depende de las temperaturas intermedias.

En la figura 3.3 ambos instrumentos marcarán igual, es decir la corriente circulante dependerá en ambos casos de T1 y T2 exclusivamente.

Figura 3.3 Ley de temperaturas intermedias. La corriente medida en las dos figuras es la misma [4].



La tensión de una termocupla cuyas juntas se hallan a temperaturas T y TR respectivamente es [4]:

$$E = K_1 (T - T_R) + K_2/2 (T^2 - T_R^2) + K_3 (T^3 - T_R^3) + \dots \quad (3.7)$$

Donde K_1, K_2, K_3, \dots son constantes de linealidad.

Se ve que a medida que $(T - T_R)$ crece la respuesta se hace no-lineal.

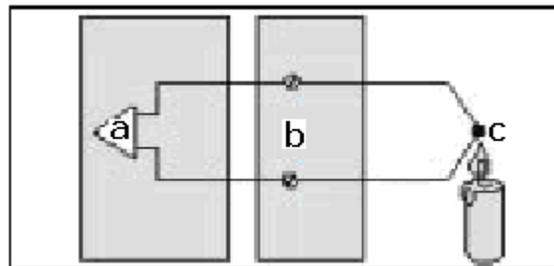
Es deseable entonces que para que una termocupla tenga un gran rango de medición, se debe conseguir que [4]:

- a) K_1 sea lo mayor posible
- b) K_2, K_3, \dots, K_n sean lo menor posible
- c) El punto de fusión de sus metales componentes sea lo mayor posible.

3.3.3 Acondicionamiento de señal para una termocupla Aunque el termopar es económico, resistente (tienen una estabilidad bastante buena a lo largo del tiempo), tiene una linealidad y exactitud razonable, responden rápidamente a los cambios de temperatura y pueden operarse en un rango de temperatura bastante amplio, el termopar requiere de un acondicionamiento de señal especial.

Un termopar opera bajo el principio de que una junta de metales no similares genera un voltaje que varía con la temperatura. El problema consiste en que al conectar el cable del termopar al cable que lo conecta al dispositivo de medición se crea una junta termoeléctrica adicional conocida como junta fría. Entonces el voltaje medido, incluye el voltaje del termopar y el voltaje de junta fría [4]. Ver Figura 3.4.

Figura 3.4 (a) Junta de referencia (b) Junta fría (c) Junta de medición

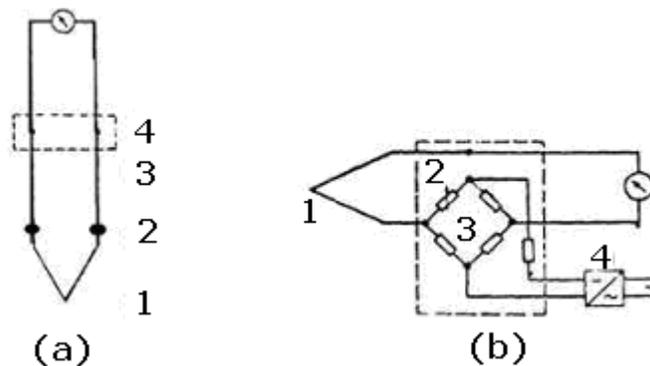


El método para compensar este voltaje de junta fría no deseado es conocido como compensación de junta fría, y se puede lograr de tres maneras distintas:

- El método básico y más exacto es el de controlar la temperatura de la junta de referencia, normalmente colocando la junta en un baño de hielo (0°C).

- Otro método consiste en medir la temperatura en la junta de referencia utilizando cualquier tipo de dispositivo de medición de temperatura, y luego, con base en esa temperatura y a la salida eléctrica de la junta de medición compensar la lectura de la temperatura de la junta de medición.
- El tercer método es una compensación eléctrica, que también implica la utilización de un dispositivo sensor de temperatura para medir la temperatura de la junta de referencia; sin embargo, en lugar de calcular la compensación a ser aplicada a la salida de la junta de medición, el sensor de temperatura de la junta de referencia se halla incorporado dentro del circuito eléctrico de la termocupla, donde agrega o quita los milivoltios necesarios en la junta de referencia a fin de corregir automáticamente la salida de la termocupla (fig. 3.5).

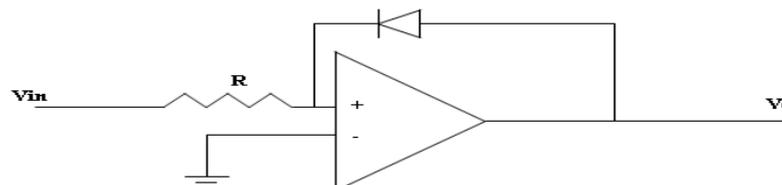
Figura 3.5 (a) Esquema de una termocupla y su sistema de medición: 1. Junta de medición. 2. Junta de corrección. 3. Cable compensado. 4. Junta de referencia. (b) Sistema electrónico de compensación de junta de referencia: 1. Termocupla. 2. Cable compensado. 3. Compensador de milivoltios. 4. Fuente de tensión constante.



Sensibilidad y ruido son otros factores importantes que se deben considerar cuando se mide con termopares. Las salidas de los termopares son muy pequeñas y cambian de 7 a 50 μV por cada grado (1°C) de cambio en temperatura, haciendo a las señales muy susceptibles a los efectos de ruido eléctrico. Es por esto que los acondicionadores de termopares incluyen filtros de ruido paso bajo para suprimir el ruido entre 50 y 60 Hz, además incluyen amplificadores de instrumentación (el voltaje offset debe ser reducido) de alta ganancia para aumentar el nivel de la señal.

En una termocupla, la fuerza electromotriz o voltaje generado, no es una función lineal de la temperatura. Un método que a menudo se utiliza para transformar una salida no lineal en lineal implica el uso de un amplificador operacional. Dicho circuito puede ser diseñado para tener una relación no lineal entre su entrada y su salida, de modo que cuando la entrada no es lineal, la salida si lo es. Un ejemplo se representa en la figura 3.6, donde se utiliza un diodo en el bucle de realimentación. El resultado es una relación lineal entre la salida V_o y la entrada V_{in} .

Figura 3.6 Linealización de la señal V_{in} se utiliza un diodo en el bucle de realimentación de un amplificador operacional.



4. CONTROLADOR DE TEMPERATURA

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

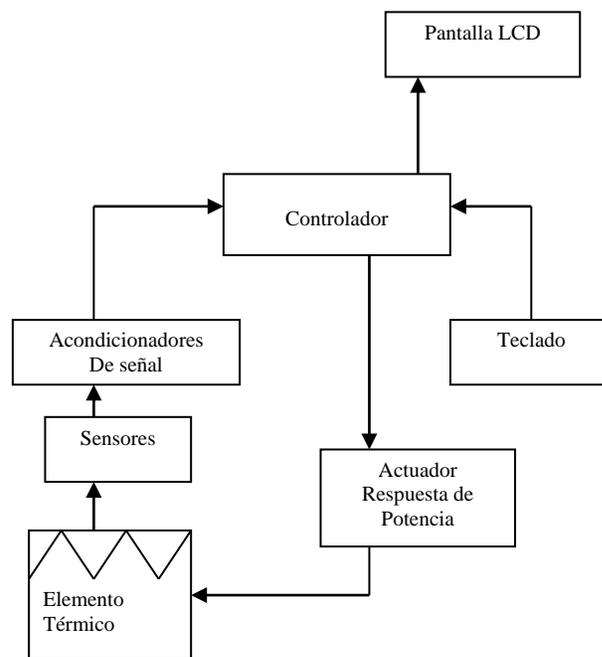
El equipo desarrollado es un sistema de control de temperatura para tres zonas (llámese zona a una de varias partes donde se desea controlar una temperatura específica, independiente de la variación de temperatura en otro lugar cercano). Este tipo de control es requerido en la industria del plástico con el propósito de tener el control de las temperaturas en las tres secciones que conforman la cámara de calor de una máquina extrusora de plástico.

Con el fin de medir y controlar un fenómeno físico, como lo es la temperatura, se ha implementado un control ON-OFF que tiene la capacidad de hacer tres mediciones simultáneas, sin necesidad de implementar un control individual para cada zona, así que este instrumento toma la lectura de tres termopares tipo k, que están en constante monitoreo de la temperatura presente en la máquina extrusora, para posteriormente mandar una señal de respuesta al elemento térmico (resistencia) encargado de calentar cada zona.

El diagrama en bloques del controlador se muestra en la figura 4.1. Dicha figura muestra que el sistema incluye una pantalla LCD para visualización de la variable a controlar y un teclado para fijar parámetros de control (temperaturas de referencia), lo cual constituye la interfaz de usuario necesaria para el funcionamiento del sistema.

El componente principal del controlador de temperatura es un dispositivo programable (PIC programmer integrated circuit), que dispone de una variedad de funciones que le permiten recibir las señales de las termocuplas, y comparar estos valores con las temperaturas de referencia ingresadas por el usuario, para de esta manera proporcionar una señal de control, que permite mantener la temperatura del proceso de extrusión, en los valores referenciados por el usuario.

Figura 4.1 Diagrama en bloques del controlador. Se representa la zona de control.



El controlador en su totalidad, dispone de seis entradas, tres de las cuales provienen de los sensores de temperatura (termocuplas tipo k), encargados de proporcionar la temperatura de cada una de las zonas que conforman la cámara de calor de la máquina extrusora, y las otras

tres entradas son las temperaturas de referencia que ingresa el usuario por medio de un teclado matricial.

El controlador dispone, también, de tres salidas dirigidas a tres módulos de potencia, estos módulos ejecutan acciones como resultado de la programación realizada en el controlador y en función de la información que proporcionan los dispositivos de entrada, garantizando una respuesta relativamente instantánea del sistema hacia las resistencias encargadas de la calefacción en la máquina.

Finalmente, el controlador en su panel frontal, dispone de tres señales luminosas (LED), uno para cada sensor de temperatura, que en caso de estar encendido, indica que la termocupla a la cual pertenece esta desconectada o rota.

4.2 FUNCIÓN DEL CONTROLADOR

En principio el controlador realizará el control de temperatura en una extrusora de plástico, para esto el controlador a través de su interfaz con el usuario, recibe las temperaturas con las cuales se quiere que funcione cada sección de la cámara de calor de la máquina; estas temperaturas de referencia para el proceso de extrusión están en un rango comprendido entre los 100⁰C y los 300⁰C, esto quiere decir que las termocuplas van a medir temperaturas que van desde la temperatura ambiente (más o menos 17⁰C) cuando apenas se conecta la máquina, a un máximo de 300⁰C.

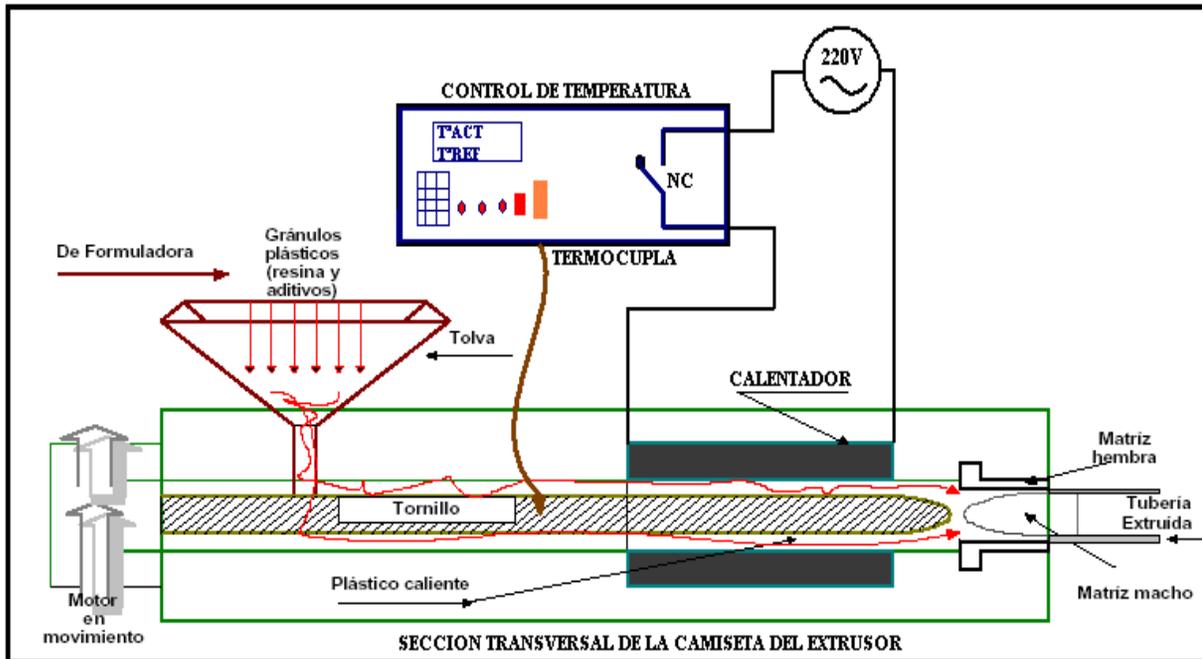
Cada vez que se inicializa el sistema, por medio del botón de encendido presente en el panel frontal del controlador, o cada vez que se cancela

el sistema por medio del botón de reset y nuevamente se inicializa el programa que gobierna el controlador, la orden de control inmediata, que se imparte para los tres módulos de potencia, es para que se permita el paso de corriente hacia las resistencias calefactores de la máquina extrusora.

La explicación del por qué se permite el paso de corriente a las resistencias, a penas se enciende el controlador, aún sin siquiera haberse ingresado las temperaturas de referencia, es por que el cilindro calefactor, que inicialmente debe encontrarse en una temperatura alrededor de la temperatura ambiente, se demora en promedio una hora para alcanzar su temperatura óptima de trabajo (las temperaturas de referencia), así que el operario tiene tiempo suficiente para ingresar las tres temperaturas a controlar.

Al permitirse el paso de corriente hacia las resistencias, estas empiezan a calentar lentamente las tres secciones que conforman el cilindro de la máquina extrusora, de tal manera que el programa en el microcontrolador, comienza a detectar cambios de temperatura por medio de las termocuplas (ver figura 4.2). El microcontrolador para cada sección, compara la temperatura actual del cilindro (proporcionada por el termopar), con la temperatura de referencia (proporcionada por el usuario), y cuando la temperatura actual de una zona llega a ser mayor que la temperatura de referencia de dicha zona, el microcontrolador envía una señal al respectivo módulo de potencia para que se suspenda el paso de corriente a la resistencia calefactora de la zona en cuestión. (Ver en Anexo1 El Manual de Usuario).

Figura 4.2 Diagrama del controlador de temperatura conectado a la máquina extrusora. Se representa la zona de control.



4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

El sistema consta de cuatro módulos principales:

1. Sensado y acondicionamiento de señal.
2. Programación del microcontrolador (Sistema principal de control y proceso de señales)
3. Interfaz de usuario
4. Respuesta de potencia.

4.3.1 Sensado y acondicionamiento de señal Una de las principales y más delicadas etapas de un sistema automatizado de supervisión y control es la interfaz de entrada, por que normalmente los sensores

ofrecen una variación de señal muy pequeña y es muy importante equilibrar las características del sensor con las del circuito que le permite medir, acondicionar, procesar y actuar con dichas medidas (el microcontrolador).

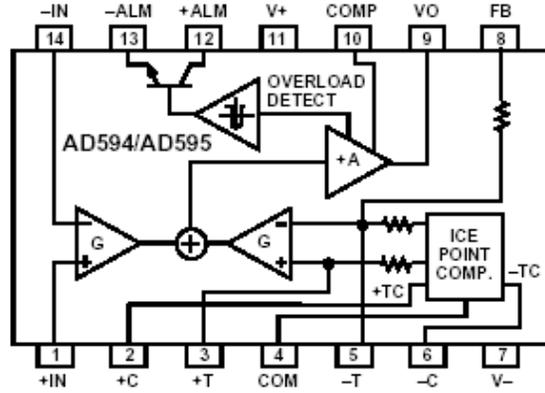
Para medir las temperaturas presentes en la máquina extrusora, se utilizaron termocuplas tipo k, adaptadas en cada una de las zonas del cilindro de la máquina. El hecho de que las termocuplas sean dispositivos de bajo nivel de tensión, a la vez que de baja impedancia, hizo que el acondicionador de señal en este caso fuera totalmente imprescindible. Además, se tenía que realizar el procedimiento de compensación de junta fría y la linealización de la señal proveniente del termopar.

Analog Devices dispone de unos circuitos integrados acondicionadores de señal para termopares tipo k, como el AD595, mostrado en la figura 4.3, el cual contiene un amplificador de instrumentación, un compensador lineal, y una salida de alarma de rotura o desconexión del termopar; se alimenta a +5V y suministra una salida lineal de 10mV/°C.

En el controlador de temperatura se emplearon 3 integrados AD595 para acondicionar la señal de cada una de las termocuplas, los cuales funcionan de la siguiente manera:

La termocupla se conecta a los pines 1 y 14 del AD595, y estas entradas se conectan internamente a un preamplificador diferencial (ver figura 4.3). Este es un amplificador que usa la temperatura local como su referencia.

Figura 4.3 Integrado AD595. Diagrama funcional [7].



El circuito de compensación (ICE POINT COMP) desarrolla un voltaje igual al producido por la termocupla cuando mide la temperatura local, con referencia de 0°C. Este voltaje se aplica entonces a un segundo preamplificador cuyo rendimiento se suma con el rendimiento del amplificador de la entrada. El rendimiento resultante de la suma se aplica entonces a la entrada de un amplificador de rendimiento principal. Para producir un factor de escala de 10 mv/°C, el AD595 tiene una ganancia de fábrica calculada de la siguiente manera: a una temperatura de 25°C, una termocupla tipo k tiene una sensibilidad de 40.44µV/°C, la ganancia es de 247.3 que es el resultado de dividir 10mV entre 40.44µV/°C.

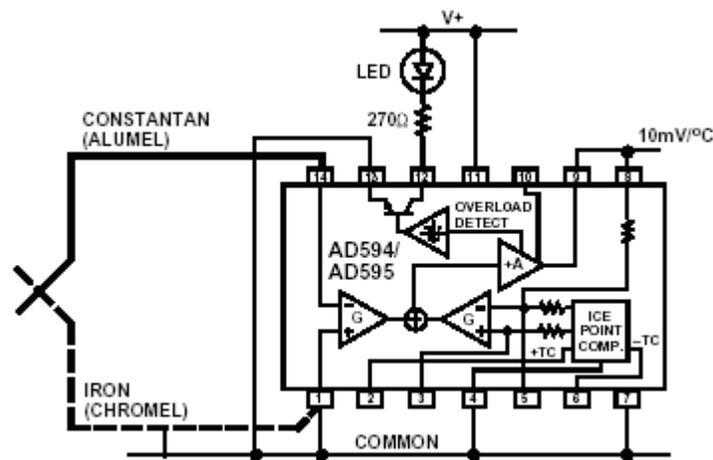
El voltaje de salida de la termocupla no es lineal con respecto a la temperatura, pero como el AD595 es un amplificador lineal de la señal compensada, la siguiente función de transferencia pudo ser utilizada para determinar el voltaje de salida del AD595:

$$V_{AD595 \text{ (output)}} = (V_{T_{ipok}} + 11 \mu V) * 247.3 \quad (4.1)$$

Los $11 \mu\text{V}$ que se introducen en la ecuación, hacen referencia al voltaje offset del AD595 [7].

4.3.1.1 Circuito de alarma para las termocuplas A través del camino de realimentación, el amplificador principal del AD595 mantiene un equilibrio en sus entradas. En caso de que la termocupla este rota o el circuito este abierto a la entrada del dispositivo, estas entradas se desequilibran, la ausencia se detecta, y el circuito de descubrimiento de carga excesiva maneja un transistor n-p-n que puede activar una alarma. Ver figura 4.4.

Figura 4.4 Circuito de alarma para determinar ruptura o desconexión de una termocupla [7].



El panel frontal del controlador de temperatura dispone de tres LED, conectados como se ilustra en la figura 4.4. Al estar cada una de las termocuplas conectadas a su respectiva alarma, en caso de presentarse una ruptura o desconexión, el LED perteneciente a dicha termocupla se enciende.

4.3.2 Programación del microcontrolador Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los efectores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillito, pero completo computador contenido en un circuito integrado.

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador [8].

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes [9]:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de entrada/salida para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos: temporizadores, Puertas serie y paralelo, conversores analógico/digital, Conversores digital/analógico, etc.

- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

En este trabajo la programación del microcontrolador se implementó para realizar las siguientes funciones:

- Conversión análoga a digital de la señal proveniente de los sensores.
- Conversión de la lectura del ADC en temperatura.
- Manejo de la etapa de TRIACs (depende de la comparación de la temperatura actual con la temperatura preseleccionada).
- Lectura del teclado matricial de selección.
- Envío de datos para el despliegue de éstos en la pantalla LCD.

La programación fue realizada en ensamblador utilizando el programa MPLAB de Microchip Technology, conformado de una serie de instrucciones necesarias para programar el PIC 16f8777, que fue el utilizado (Ver anexo 2).

4.3.2.1 Adaptación de una pantalla LCD a un microcontrolador

La pantalla de cristal líquido o LCD (*Liquid Crystal Display*) es un dispositivo controlado de visualización gráfico para la presentación de caracteres y símbolos, en este caso dispone de 2 filas de 16 caracteres cada una y cada carácter dispone de una matriz de 5x7 puntos (pixels), este dispositivo esta gobernado internamente por un microcontrolador que regula todos los parámetros de presentación. Este modelo es el más comúnmente usado y esta información se basa en el manejo de este u otro LCD compatible. Ver tabla 4.1.

Características principales de LCD:

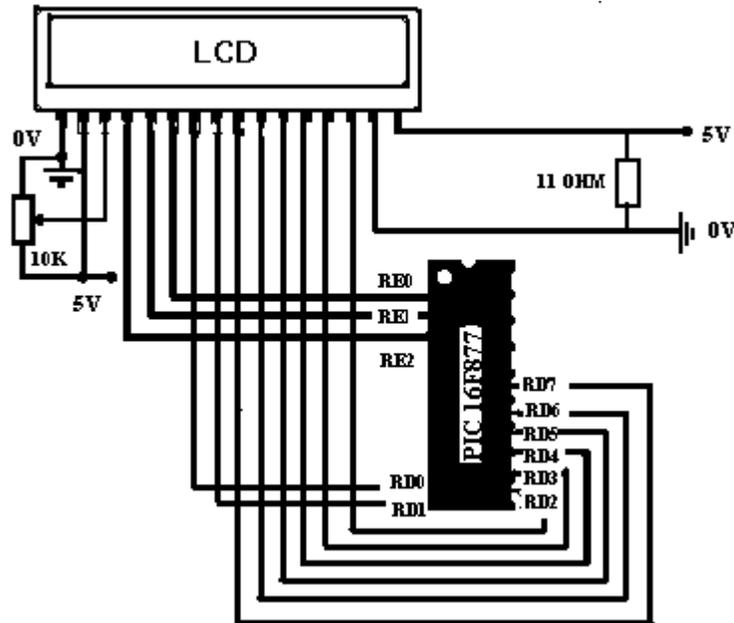
- Pantalla de caracteres ASCII.
- Desplazamiento de los caracteres hacia la izquierda o la derecha.
- Proporciona la dirección de la posición absoluta o relativa del caracter.
- Memoria de 40 caracteres por línea de pantalla.
- Movimiento del cursor y cambio de su aspecto.
- Permite que el usuario pueda programar 8 caracteres.
- Conexión a un procesador usando un interfaz de 4 u 8 bits

La comunicación con la pantalla LCD se puede hacer por medio de sus pines de entrada de dos maneras posibles, con bus de 4 bits o con bus de 8 bits, este último es el que se utilizó en el controlador de temperatura y la rutina también se realizó para este (ver anexo3). En la figura 4.5 se presenta la manera de conectar el LCD con el Pic16f877.

Tabla 4.1 Descripción de pines de la pantalla LCD

PIN Nº	SIMBOLO	DESCRIPCION
1	Vss	Tierra de alimentación GND
2	Vdd	Alimentación de +5 VCC
3	Vo	Contraste del cristal liquido. (0 a +5V)
4	RS	Selección del registro de control/registro de datos: RS=0 Selección registro de control RS=1 Selección registro de datos
5	R/W	Señal de lectura/escritura: R/W=0 Escritura (Write) R/W=1 Lectura (Read)
6	E	Habilitación del modulo: E=0 Módulo desconectado E=1 Módulo conectado
7-14	D0-D7	Bus de datos bidireccional.

Figura 4.5 Conexión del módulo LCD con el PIC16f877



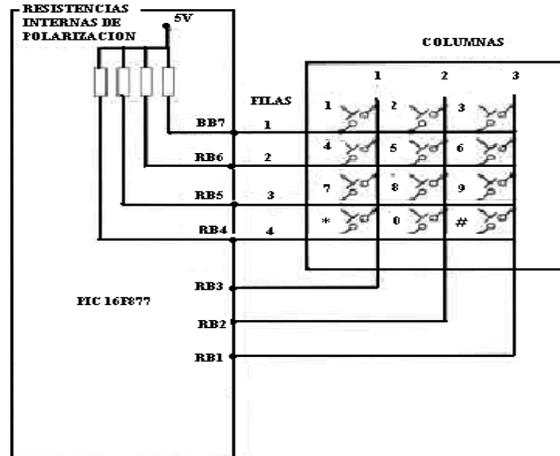
Como puede apreciarse el control de contraste se realiza al dividir la alimentación de 5V con una resistencia variable de 10K. Los pines 15 y 16 sirven para poner a funcionar el backlight de la pantalla. Las líneas de datos (RD0 a RD7) son triestado, esto indica que cuando el LCD no esta habilitado, sus entradas y salidas pasan a un estado de alta impedancia.

4.3.2.2 Adaptación de un teclado matricial a un microcontrolador

El teclado matricial es un dispositivo de entrada de datos que consta en este caso de 12 teclas o pulsadores, dispuestos e interconectados en filas y columnas. El teclado matricial se caracteriza por estar cada una de las teclas conectada a dos líneas (una columna y una fila) que la identifican. De este modo, el número de teclas que pueden conectarse

es el producto de filas por el de columnas. La figura 4.6 muestra la manera correcta de conectar un teclado matricial a un PIC

Figura 4.6 Conexión del teclado matricial con el PIC16f877



La técnica de programación requiere tanto de entradas como de salidas. Las filas están conectadas a las patillas de salida y las columnas a las de entrada. Se comienza el testeo colocando a '0' la primera fila, y a '1' las restantes. Si la tecla pulsada estuviese en la columna '0', ésta colocaría en su línea un '0' lógico. Bastará con hacer un muestreo de las columnas, buscando el 0, para saber la tecla exacta que fue pulsada en la matriz. Si no es pulsada ninguna tecla en una fila, las entradas se encuentran en estado flotante, razón por la que son necesarias las resistencias de polarización internas del Pic, que mantienen las entradas a nivel alto. Dichas resistencia permiten conectar el teclado matricial sin añadir componentes externos (ver anexo4).

4.3.3 Interfaz de usuario Una vez el controlador es encendido o reinicializado, el primer paso que realiza es configurar todos los pines que posee el microcontrolador, las entradas análogas y digitales para la

adquisición de datos, y las salidas digitales. Después de la configuración de los puertos, el sistema configura la pantalla LCD y comienza a mostrar los distintos mensajes, solicitando la información que el usuario debe ingresar por medio del teclado matricial. Los mensajes que muestra el controlador a través de la pantalla, en su orden de aparición, se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Interfaz de usuario: mensajes visualizados en la pantalla LCD

No	MENSAJE			
1	"INGRESE TREF1:"			
2	"INGRESE TREF2:"			
3	"INGRESE TREF3:"			
4	Tref	Tref1	Tref2	Tref3
	Tact	Tact1	Tact2	Tact3

4.3.3.1 Funcionamiento del teclado Teniendo en cuenta el rango de temperatura de referencia en el cual opera la máquina (100 °C a 300 °C) y en común acuerdo con el operario encargado, se determinó que la forma más sencilla de ingresar las temperaturas de referencia, era ingresar las temperaturas en números de tres dígitos, por tal razón el controlador se diseñó de tal manera que recibe las temperaturas de referencia en grupos de tres dígitos, y en caso de necesitarse una temperatura inferior a los 100°C, se debe ingresar el número anteponiendo un cero, por ejemplo 45°C=045°C.

4.3.3.2 Funcionamiento de la pantalla LCD Inmediatamente después de encendido el controlador, a través de su interfaz con el

usuario, funciona de la siguiente manera: despliega en pantalla un mensaje que pide ingresar la primera temperatura de referencia (la primera sección del cilindro de la extrusora), espera que el usuario a través del teclado ingrese un número de tres dígitos y automáticamente despliega el siguiente mensaje, que pide del usuario la temperatura de referencia dos (la segunda sección del cilindro de la extrusora), espera que el usuario ingrese un numero de tres dígitos y aparece el mensaje que pide la temperatura de referencia tres (la tercera y última sección del cilindro de la extrusora), espera del usuario la temperatura de tres dígitos correspondiente a esta sección, y automáticamente despliega en pantalla la información suministrada por el usuario de las tres temperaturas de referencia (en el orden en que se suministraron), y las temperaturas actuales que registran las termocuplas (acopladas en cada una de las secciones de la cámara de calor de la máquina). Ver figura 4.7.

Cuando se oprime la tecla del tercer dígito de cada temperatura, el microcontrolador automáticamente almacena el valor de temperatura ingresado y envía un nuevo mensaje a través de la pantalla. Mientras no se opriman los tres dígitos, el controlador va a estar en permanente espera de que se oprima una tecla.

Figura 4.7 Pantalla LCD de dos líneas. Interfaz de usuario.

TREF	120	150	200
TACT	100	105	102

En el ejemplo que ilustra la figura 4.7, el usuario ingresó como temperatura de referencia uno, para la primera sección de la extrusora 120°C, para la segunda sección ingresó como referencia 150°C y para la tercera sección 200°C. Por su parte las termocuplas adaptadas en cada una de las secciones de la máquina, registran que la temperatura actual de la primera sección es 100°C, de la segunda sección es de 105°C y la tercera sección está actualmente a 102°C.

4.3.3.3 Funcionamiento del botón de reset El panel frontal del controlador cuenta además con un botón de reset, de tal manera que si el usuario comete algún error al momento de ingresar las temperaturas de referencia, en cualquier momento puede presionar este botón y el sistema actual se cancela, inicializándose nuevamente el programa, así que el controlador pide nuevamente al usuario las temperaturas de referencia.

4.3.4 Sistema respuesta de potencia Para controlar la activación o desactivación de grandes cargas eléctricas a tensiones relativamente altas a partir de señales producidas por circuitos de baja potencia y baja tensión, existen, a grosso modo, dos métodos: mediante un relé o mediante un circuito electrónico. Cada sistema tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

La principal ventaja del relé es su flexibilidad. Al ser un interruptor activado por un electroimán, puede conmutar cargas de cualquier tipo, ya sean de baja o de alta tensión, de corriente alterna o continua, y prácticamente de cualquier potencia (a los relés diseñados para potencias muy altas se les llama contactores), y el aislamiento que proporcionan entre el circuito de control y el de potencia es absoluto.

Entre sus desventajas están su fragilidad y poca duración (debido a que son dispositivos electromecánicos) y su poca seguridad, ya que a veces se quedan "enganchados", es decir conmutados, cuando dejamos de aplicar tensión al electroimán (esto ocurre cuando los contactos se quedan soldados por efecto del calor producido al conmutar). Otra desventaja menos evidente es su baja velocidad de conmutación, y el chasquido que emiten cada vez que se cierra el contacto.

Los dispositivos electrónicos o de estado sólido (llamados así porque no tienen partes móviles) son menos flexibles, ya que tienen que ser diseñados específicamente para el tipo de cargas que van a conmutar, pues su rango de tensión y carga es más limitado, pero a cambio tienen muchas ventajas. La principal es su robustez y duración (al no haber partes móviles su vida es casi ilimitada). Además, se puede diseñar el circuito para que la conmutación se produzca en el paso por cero de la tensión de red (cuando la tensión instantánea es aproximadamente de 0V) con lo que se minimizan las interferencias y su velocidad de conmutación es enormemente alta. Su tradicional inconveniente era que resultaba complicado aislar completamente el circuito de control de la carga, pero esto ha quedado hoy en día solucionado mediante optoacopladores. Por último, unas de sus mayores ventajas son el precio, mucho menor que el de los relés y su versatilidad en el control de la señal de activación, esto es, que es compatible con salidas TTL. Por todo lo anterior, este ha sido el sistema elegido. El aislamiento entre el circuito de control (la salida del Pic) y la carga (resistencia calefactora) se hizo mediante optoacoplador y, más concretamente, mediante un MOC3041, un optotriac con conmutación en el paso por cero y un aislamiento entre entrada y salida mayor que 1.500V. El TRIAC integrado en el optotriac (activado por un diodo emisor de luz)

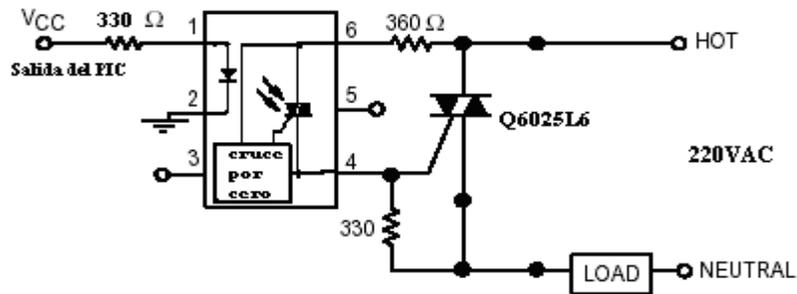
puede conmutar cargas de hasta 100mA, o lo que es lo mismo, 22W a 220V. Si el dispositivo a controlar no supera esta potencia, no haría falta nada más, pero como el elemento térmico de la máquina extrusora demanda una corriente del orden de 20A, con un consumo proporcionado por una fuente de 220 Vac, es decir 4.400W, se requiere añadir un TRIAC para manejo de mayor potencia, que será gobernado por el optotriac.

Para el diseño de este sistema se hizo un arreglo de tres pequeños módulos de potencia, cuyos dispositivos principales son el TRIAC Q6025L6 y el optoacoplador MOC3041. El TRIAC fue seleccionado según los siguientes datos: Voltaje pico de 600 V, corriente RMS en estado de encendido de 25 A.

El módulo de potencia fue diseñado con las siguientes características:

- Control de 3 dispositivos totalmente independientes (tres resistencias).
- Entradas de control (salidas del Pic): acoplamiento por optoacoplador, con un consumo aproximado de 15 mA por entrada. Tensión de disparo: entre 3V y 6V.
- Salidas de potencia independientes: 220 VAC, 20A, 4400W.
- Aislamiento entre entradas y salidas: mayor que 1.500V.
- Sistema de conmutación: electrónico mediante TRIAC, con disparo en el paso por cero.

Figura 4.8 Módulo de Potencia.



4.3.4.1 Principio de funcionamiento del módulo de potencia En la figura 4.8 puede verse la aplicación práctica de gobierno de una carga mediante un TRIAC (Q6025L6). La señal de control (pulso positivo) llega desde un circuito de mando exterior (Pic 16f877) al pin 1 del MOC3041, por lo que circulará corriente a través del diodo emisor perteneciente al MOC (opto acoplador). Dicho diodo emite un haz luminoso que hace conducir al fototriac a través de la resistencia de 360 ohms, tomando la tensión del ánodo del TRIAC de potencia Q6025L6. Este proceso produce una tensión de puerta suficiente para excitar al TRIAC de potencia, que pasa al estado de conducción, provocando el paso de corriente hacia la resistencia calefactora.

Se debe recordar que el TRIAC se desactiva automáticamente cada vez que la corriente pasa por cero, es decir, en cada semiciclo, por lo que es necesario redisparar el TRIAC en cada semionda o bien mantenerlo con la señal de control activada durante el tiempo que sea necesario. Es importante tener en cuenta que el TRIAC debe ir montado sobre un dissipador de calor, constituido a base de aletas de aluminio, de forma que el semiconductor se refrigere adecuadamente. En el controlador de

temperatura, cada TRIAC cuenta con su respectivo disipador de calor, a demás al interior del controlador se encuentra un pequeño ventilador, estratégicamente colocado con el fin de aumentar la refrigeración de la etapa de potencia.

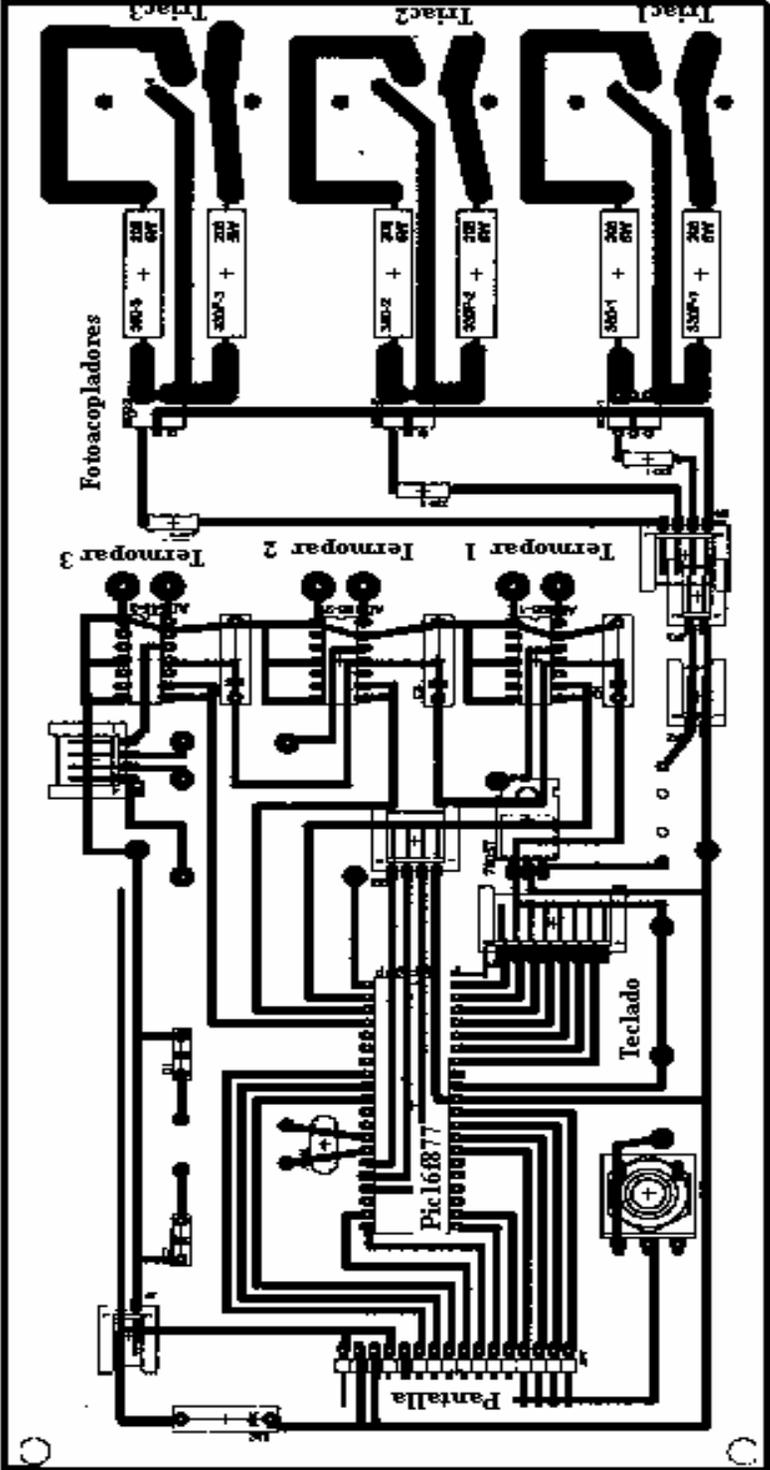
Por último, las salidas de cada TRIAC (las que permiten el paso de corriente hacia las resistencias), se conectaron a través de cable número 10 a tomas bifásicas, fabricadas para soportar 25A, 250V, 60Hz, 6250W.

4.4 REALIZACIÓN PRÁCTICA

El sistema en su totalidad se implementó en dos tarjetas impresas, las cuales se encuentran distribuidas de la siguiente manera:

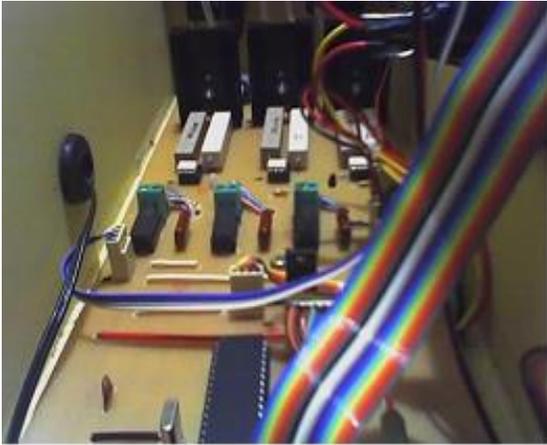
- La tarjeta principal mide 13cm de ancho x 30cm de largo, en ella se encuentra el cerebro del controlador (pic16f877), la etapa de acondicionamiento para las termocuplas, la etapa de potencia y los conectores de: las tres termocuplas tipo k, el teclado, la pantalla LCD y el ventilador. La figura 4.9 muestra la distribución de la tarjeta para cada etapa.
- Una tarjeta pequeña de (6 x 7) cm, en la cual se encuentran los tres diodos emisores de luz de alarma para los sensores y el botón de reset.
- Las dos tarjetas se instalaron en el interior de una caja metálica de dimensiones (21x37x15) cm. Ver figura 4.10.

Figura 4.9 Controlador de Temperatura. Tarjeta Principal.

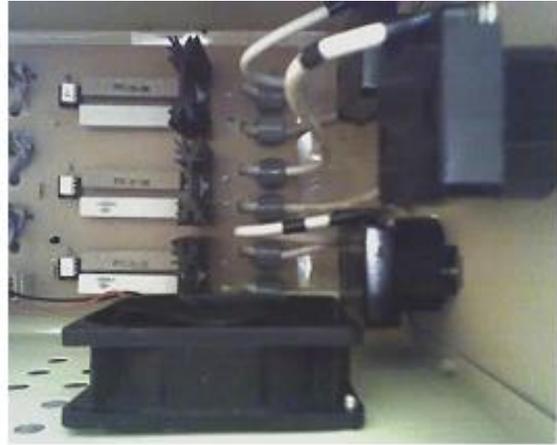


MICROCONTROLADOR ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL ETAPA DE POTENCIA

Figura 4.10 Controlador de Temperatura. Diseño interior: (a) Tarjeta principal. (b) Etapa de potencia. (c) Conectores de sensores. (d) Termocupla tipo K



(a) Tarjeta principal



(b) Etapa de potencia



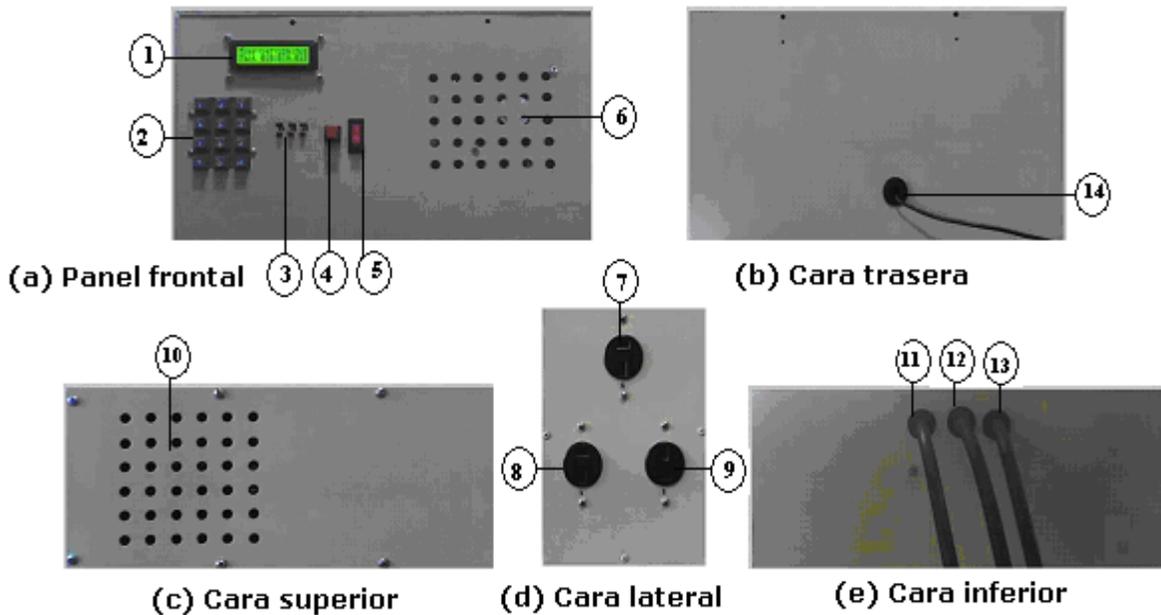
(c) Conectores de sensores



(d) Termocupla tipo K

El controlador de temperatura programable se describe en la figura 4.11.

Figura 4.11 Controlador de Temperatura Programable para una Máquina Extrusora de Plástico.



(a) Panel frontal:

1. Pantalla LCD
2. Teclado
3. Tres LEDs (alarmas de los sensores)
4. Botón de reset
5. Botón de encendido.
6. Rejilla de salida de aire del ventilad

(b) Cara trasera:

14. Entrada de alimentación del controlador.

(c) Cara superior:

10. Rejilla de entrada de aire

(d) Cara lateral:

- 7, 8, 9. Tomas bifásicas.

(e) Cara inferior:

- 11, 12, 13. Salidas de termocuplas tipo K

Características generales del controlador de temperatura (ver figura 4.12):

- Dimensiones: 37cm de ancho, 21cm de alto, 15cm de fondo.
- Tres termocuplas tipo k de 2.5m de largas con punta atornillable.
- Rango de medición: 1°C a 500°C
- Linealización de todo el rango de medición
- Compensación de junta fría
- Indicación de alarmas para ruptura o desconexión de las termocuplas
- Alimentación: 110VAC
- Consumo: 3.6W
- Despliegue de temperatura en pantalla LCD
- Teclado para recepción de temperaturas de referencia
- Tres salidas de control ON_OFF: tomas bifásicas con capacidad máxima de 25A, 250VAC, 6250W.

Figura 4.12 Controlador de temperatura programable visto desde diferentes ángulos.



(a) Panel frontal y cara inferior



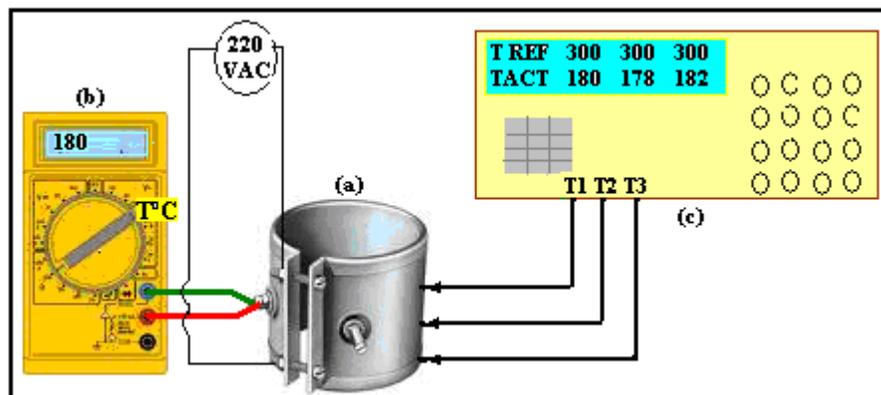
(b) Panel frontal y cara lateral

4.5 PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas del controlador de temperatura se realizaron conectando el equipo a las resistencias de la máquina extrusora. El funcionamiento del sistema se evaluó en diferentes etapas:

- Primero se comparó la medición de los sensores de temperatura con referencia a un termómetro digital comercial, conectando de la siguiente manera: las tres termocuplas del controlador se atornillaron a la misma resistencia conectada a 220v, junto con la termocupla del termómetro digital (Ver figura 4.13). La prueba se realizó en un rango de temperatura de 18°C a 300°C en un tiempo aproximado de 25 minutos, el resultado fue satisfactorio por que las cuatro termocuplas registraron un valor aproximadamente igual, presentándose variaciones de más o menos 3°C.

Figura 4.13 Montaje experimental para la primera prueba. (a) Resistencia eléctrica conectada a 220VAC. (b) Termómetro digital comercial. (c) Controlador de temperatura programable para una extrusora.



- A continuación se revisó que el controlador de temperatura permitiera paso de corriente a las resistencias, cuando la temperatura actual estuviera por debajo de la temperatura de referencia, y se apagara cuando la temperatura se encontrara por encima de la temperatura de referencia (ver figura 4.14). Esta prueba se realizó durante 8 horas dos días seguidas. La prueba transcurrió satisfactoriamente, ya que el principal inconveniente que se pudo haber presentado era el recalentamiento de los TRIACs y del controlador en general, pero la refrigeración del controlador consistente en el ventilador interno, las rejillas de la caja y los disipadores de calor de los TRIACs, funcionó efectivamente. La figura 4.15 muestra la conexión de una de las resistencias al controlador de temperatura.

Figura 4.14 Montaje experimental para la segunda prueba. (a) Controlador de temperatura programable para una extrusora. (b) Resistencia eléctrica conectada a 220 VAC. (c) Pinza amperimétrica.

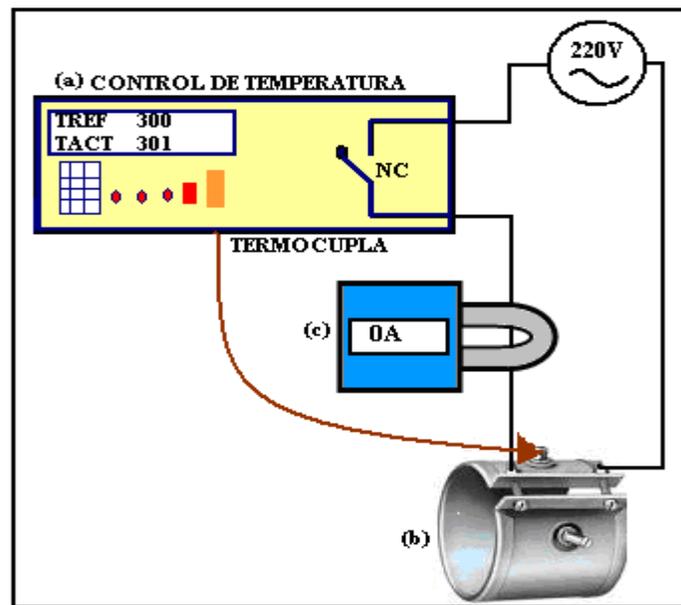


Figura 4.15 Conexión de una de resistencia al controlador de temperatura.



CONCLUSIONES

1. Debido a una adecuada aplicación de la tecnología se logró diseñar y construir un control ON-OFF de temperatura con la capacidad de hacer tres mediciones simultáneas por medio de termopares tipo k, para regular la temperatura en cada una de las tres cavidades que conforman la cámara de calor de una máquina extrusora de plástico.
2. Con el desarrollo del controlador de temperatura programable se logró dar mayor confiabilidad al proceso de fundido de una máquina extrusora de plástico, perteneciente a la microempresa Mangueras Súper, ubicada en la zona industrial de la ciudad de Popayán.
3. El uso de dispositivos programables como los microcontroladores permite la reducción de hardware y la implementación de algoritmos de control de gran confiabilidad. El bajo costo de estos dispositivos los hace ideales para implementar sistemas de control que resultan económicos para aplicación industrial.
4. La implementación de tecnología específica para las condiciones de nuestro país es esencial para que el sector del plástico logre un crecimiento sostenido que le permita mejorar las condiciones de competencia internacional, no sólo en la perspectiva de ingresar

en los mercados externos, sino también, en su propio mercado interno.

BIBLIOGRAFÍA

1. CEDEÑO, Pedro. Extrusión: Una de las técnicas de transformación de poliolefinas más utilizadas mundialmente. [online]. [2000]. Disponible en Internet: www.venezuelaenplastico.com/extrusion.htm.
2. OGATA, Katsuhico. Ingeniería de Control Moderna. México. Prentice Hall. [1998].p.212-215
3. MALONEY, Timothy J. Electrónica Industrial Moderna. México. Prentice Hall. [1997].p.295-296
4. Medición y Control Industrial. [online]. Disponible en: www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura
5. CRISTMAN, Richard. FUNDAMENTALS OF SOLID STATE PHYSICS JOHN WILEY & SONS, INC. New Cork, October 1987. ISBN: 0471810959
6. Sensores Acondicionadores Y Procesadores de Señal. [online]. Disponible en: www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf
7. Analog Devices. Datasheet AD595.

8. Introducción a los Microcontroladores. [online]. Disponible en:
www.frino.com.ar/pdf/micro1.PDF

9. USATEGUI, José M, ROMERO, Susana, ANGULO, Ignacio.
Microcontroladores PIC Diseño practico de aplicaciones. McGraw
Hill. [2000].

ANEXOS

ANEXO 1

MANUAL DE USUARIO

INTRODUCCIÓN	75
1. CARACTERÍSTICAS GENERALES	76
2. INSTALACIÓN	77
2.1 MONTAJE DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA	77
2.2 SUMINISTRO DE ENERGÍA (ALIMENTACIÓN)	78
2.3 SENSORES DE TEMPERATURA	78
2.4 ALARMAS PARA LOS SENSORES DE TEMPERATURA	79
2.5 CONTROL DE SALIDA.	81
3. DESCRIPCIÓN DEL PANEL FRONTAL	82
3.1 BOTÓN DE ENCENDIDO	82
3.2 TECLADO	82
3.3 PANTALLA LCD	82
3.4 RESET	83
3.5 ALARMAS DE LOS SENSORES	83
4. FUNCIONAMIENTO	83
5. SOLUCIONADOR DE PROBLEMAS	85

MANUAL DE USUARIO

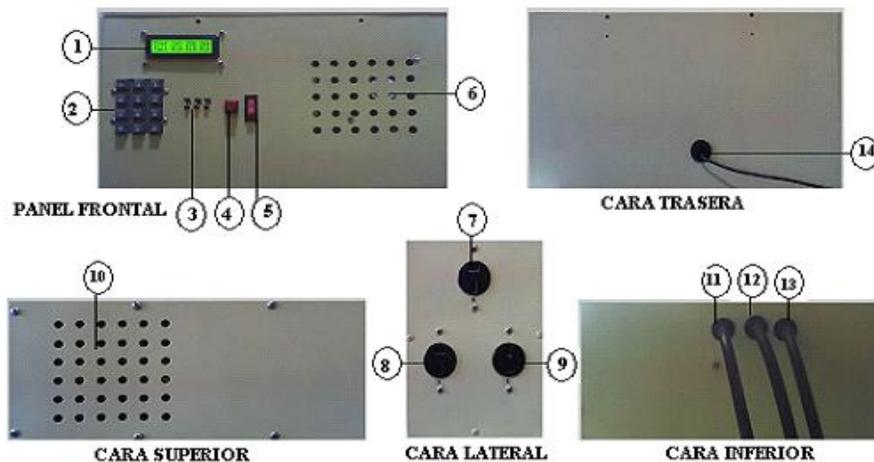
INTRODUCCIÓN

Este manual contiene información sobre la instalación y operación del controlador de temperatura programable.

Este dispositivo electrónico con tecnología de microprocesadores, ha sido diseñado para el control y/o supervisión de temperatura y esta provisto de tres (3) entradas termocuplas tipo k y tres (3) salidas de control ON_OFF independientes.

Gracias a su versatilidad y facilidad de operación, puede ser utilizado en un amplio rango de procesos donde se requiera control de temperatura: máquinas de inyección de plástico, extrusoras, calderas, hornos, industria alimenticia, etc.

Figura 1. Controlador de Temperatura Programable.



Panel Frontal:

1. Pantalla LCD
2. Teclado
3. Tres LEDs (alarmas de los sensores)
4. Botón de Reset
5. Botón de Encendido.
6. Rejilla de salida de aire del ventilador

Cara Lateral:

7, 8, 9. Tomas Bifásicas.

Cara Superior:

10. Rejilla de entrada de aire

Cara Inferior:

11, 12, 13. Salidas de termocuplas Tipo K

Cara Trasera:

14. Entrada de alimentación del controlador

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Dimensiones:** 37cm de ancho, 21cm de alto, 15cm de fondo.
- **Peso:** 1500 mg
- **Sensores:** Tres (3) termocuplas tipo k de 2.5m de largas con punta atornillable.
- **Rango de medición:** 1°C a 500°C
- **Linealización:** todo el rango de medición
- Compensación de junta fría
- **Alarmas:** Tres (3) para ruptura o desconexión de las termocuplas
- **Alimentación:** 110VAC a 50-60 Hz
- **Consumo:** 3.6W
- Despliegue de temperatura en pantalla **LCD** con backlight incluido.
- **Teclado** para recepción de temperaturas de referencia
- **Salidas de control ON_OFF:** Tres (3) tomas bifásicas con capacidad máxima de 25A, 250VAC, 6250W.
- **Ventilador** interno de refrigeración.

2. INSTALACIÓN

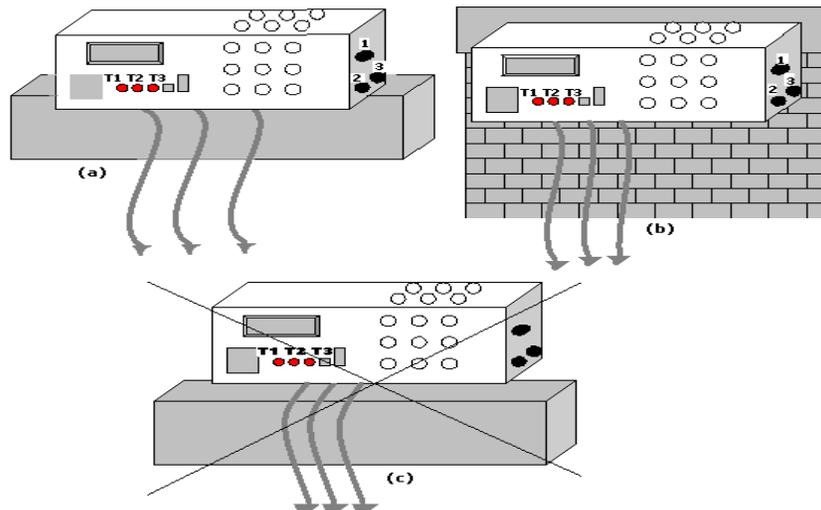
2.1 MONTAJE DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

Para obtener medidas correctas, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios al elegir el emplazamiento del controlador:

Instálelo horizontalmente de la siguiente manera:

- (a) Sobre un soporte adecuado (mueble), dejando espacio suficiente para que las termocuplas salgan libremente del controlador, sin ninguna presión. Cerciórese que las aberturas de ventilación queden abiertas. Ver figura 1a.
- (b) Ó sobre una pared sujetando el controlador de su cara trasera. Ver figura 1b.
- (c) Importante: cerciórese que las termocuplas no queden presionadas sobre la superficie del soporte que sostiene el controlador. Ver figura 1c.

Figura 2. Montaje del Controlador de Temperatura.



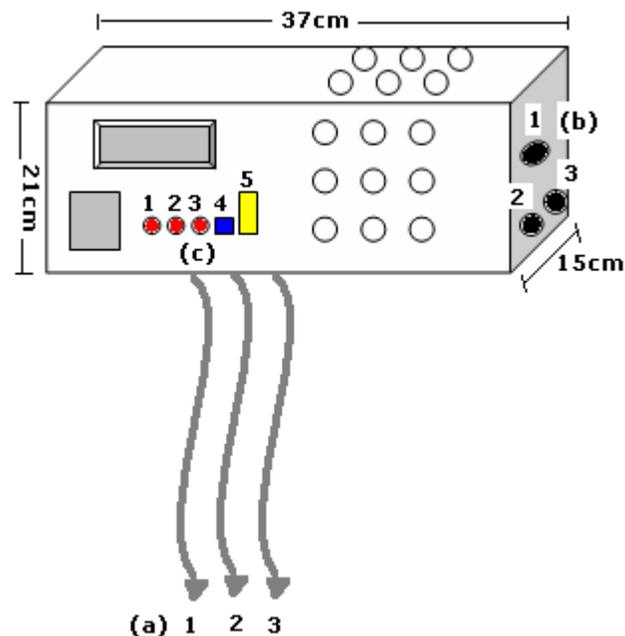
2.2 SUMINISTRO DE ENERGÍA (ALIMENTACIÓN)

El controlador requiere de una alimentación de 120 VAC a 50/60 Hz.

2.3 SENSORES DE TEMPERATURA

El controlador dispone de tres termocuplas tipo k de 2.5m de larga cada una. Cada termocupla corresponde a una zona de control específica. Ver figura 3.

Figura 3. Controlador de Temperatura de Dimensiones: (37x21x15)cm. (a) Termocuplas tipo k para la primera, segunda y tercera zona de control, contando de derecha a izquierda. (b) Salidas independientes de control ON_OFF: para la primera 1, segunda 2 y tercera 3 zona. (c) 1, 2, 3 LED de Alarma para su correspondiente termocupla, 4 botón de reset, 5 botón de encendido y apagado.



Las termocuplas cuentan con una punta atornillable, de fácil instalación. (Ver figura 4).

Importante: Asegúrese que la punta de la termocupla quede haciendo contacto con la superficie a la cual desea medirle la temperatura.

Figura 4. Termocupla Tipo k de punta atornillable.



2.4 ALARMAS PARA LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Cada termocupla del controlador dispone de un LED que de estar encendido indica que la termocupla esta desconectada o rota. Ver figura 3.

Una vez el controlador es encendido, asegúrese que todos los LEDs del panel frontal estén apagados. En caso contrario siga el siguiente procedimiento:

- Apague el controlador.
- Retire los tornillos de la tapa del controlador (6 tornillos en la cara superior y 4 tornillos en la cara lateral)
- En la tarjeta del controlador encontrara tres conectores color verde enumerados (1, 2, 3), que corresponde a cada una de las tres termocuplas. En la figura 5 se observan los conectores de las termocuplas instalados en la tarjeta.

Figura 5. Tarjeta del controlador de Temperatura. Conectores para termocuplas



Verifique que la termocupla que tiene el LED encendido este conectada, en caso contrario el conector dispone de unos tornillos que le permiten sujetar los dos alambres de la termocupla.

- Si ya verificó que la termocupla esta sujeta a su conector, cierre nuevamente el controlador y préndalo. Si el LED sigue encendido, muy seguramente la termocupla esta rota y necesita ser reemplazada.
- Para verificar si la termocupla esta rota, conecte un probador de continuidad en los dos tornillos del conector correspondiente. Si no hay continuidad, la termocupla esta rota y necesita ser reemplazada.
- Para reemplazar una termocupla siga el siguiente procedimiento: apague el controlador, retire la tapa protectora, desconecte (desatornille) la termocupla que desea reemplazar y retírela externamente simplemente halándola, posteriormente introduzca la nueva termocupla por la cara inferior del controlador, en el espacio libre, y sujete los alambres del termopar al conector correspondiente. El conector tiene marcada la polaridad correspondiente.

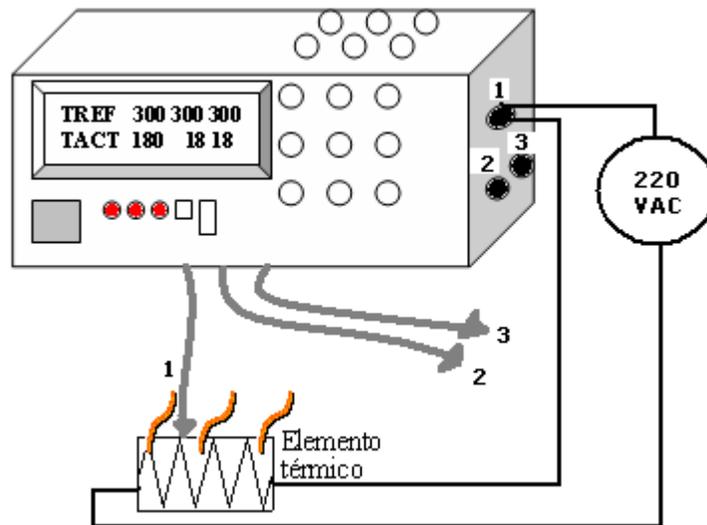
2.5 CONTROL DE SALIDA.

El controlador cuenta con tres salidas de control ON_ OFF independientes, cada una de las cuales tiene una capacidad máxima de 25A, 250VAC, 6250W.

Cada salida de control corresponde a una zona específica. Ver figura 3.

Importante: en el momento de la instalación asegúrese que la carga tenga conectada la termocupla y la salida de control de la misma zona. Por ejemplo, si conecta la termocupla 1 a la carga, la salida de control que debe utilizar es la número 1. Ver figura 6.

Figura 6. Controlador de temperatura. Cada Termocupla corresponde a una salida de control específica. (Para la salida de control 1 la termocupla 1).



Para conectar cualquiera de las salidas de control a una carga siga el siguiente procedimiento:

- Atornille a la carga, la termocupla que pertenece a la salida de control que va a utilizar.

- La salida de control es una toma bifásica. Una de sus entradas debe ser conectada directamente a la fuente de alimentación de la carga (220VAC), y la entrada restante debe conectarse a la carga. Ver figura 6. La carga debe tener uno de sus extremos conectado a la toma bifásica de la salida de control y el otro extremo conectado directamente a la fuente de alimentación.

3. DESCRIPCIÓN DEL PANEL FRONTAL

Observe la figura 1.

3.1 BOTÓN DE ENCENDIDO

El controlador cuenta en su panel frontal con un interruptor para encender o apagar el controlador.

3.2 TECLADO

Para recepción de temperaturas de referencia. El controlador se diseñó de tal manera que recibe las temperaturas de referencia en grupos de tres dígitos, y en caso de necesitarse una temperatura inferior a los 100°C, se debe ingresar el número anteponiendo un cero, por ejemplo 45°C=045°C.

3.3 PANTALLA LCD

Una vez el controlador es encendido, prende la luz de la pantalla LCD y comienza a mostrar los distintos mensajes, solicitando la información que el usuario debe ingresar por medio del teclado matricial. Los mensajes que muestra el controlador a través de la pantalla, en su orden de aparición se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Interfaz de usuario: mensajes visualizados en la pantalla LCD

No	MENSAJE			
1	"INGRESE TREF1:"			
2	"INGRESE TREF2:"			
3	"INGRESE TREF3:"			
4	Tref Tact	Tref1 Tact1	Tref2 Tact2	Tref3 Tact3

3.4 RESET

El panel frontal del controlador cuenta además con un botón de reset, de tal manera que si el usuario comete algún error al momento de ingresar las temperaturas de referencia, en cualquier momento puede presionar este botón y el sistema actual se cancela, inicializándose nuevamente el programa, así que el controlador pide nuevamente al usuario las temperaturas de referencia.

3.5 ALARMAS DE LOS SENSORES

Tres LEDs presentes en el panel frontal indican el estado de las termocuplas. Ver sección 1.4.

4. FUNCIONAMIENTO

Inmediatamente después de encendido, el controlador, a través de su interfaz con el usuario funciona de la siguiente manera: despliega en pantalla un mensaje que pide ingresar la temperatura de referencia uno, espera que el usuario a través del teclado ingrese un número de tres dígitos y automáticamente despliega el siguiente mensaje, que pide del usuario la temperatura de referencia dos, espera que el usuario ingrese un número de tres dígitos y aparece el mensaje que pide la

temperatura de referencia tres, espera del usuario la temperatura de tres dígitos correspondiente a esta sección, y automáticamente despliega en pantalla la información suministrada por el usuario de las tres temperaturas de referencia (en el orden en que se suministraron), y las temperaturas actuales que registran las termocuplas (acopladas en la carga).

Por ejemplo, en la figura 6 la pantalla muestra que el usuario ingreso 300°C de temperatura de referencia para las tres zonas de control, por su parte la termocupla 1 registra actualmente 180°C, y las otras dos termocuplas como no están conectadas, registran 18°C, que es la temperatura ambiente en ese instante.

Cada vez que se inicializa el sistema por medio del botón de encendido, presente en el panel frontal del controlador, ó cada vez que se cancela el sistema por medio del botón de reset y nuevamente se inicializa el programa que gobierna el controlador, la orden de control inmediata que se imparte para las tres salidas de control, es para que se permita el paso de corriente hacia la carga.

Al permitirse paso de corriente hacia la carga, el controlador detecta el incremento de la temperatura por medio de las termocuplas. El controlador para cada zona, compara la temperatura actual de la carga (proporcionada por el termopar), con la temperatura de referencia (proporcionada por el usuario), y cuando la temperatura actual de una zona, llega a ser mayor que la temperatura de referencia de dicha zona, el controlador envía una señal a la respectiva salida de control, para que se suspenda el paso de corriente a la carga de la zona en cuestión.

5. SOLUCIONADOR DE PROBLEMAS

En este apartado van a tratarse algunos problemas que se pueden presentar.

Si aparecen señales de mal funcionamiento debe verificarse que:

- Todos los cables están correctamente conectados.
- No hay cables sueltos ni conectores aflojados.
- La fuente de alimentación funciona adecuadamente
- El controlador está instalado de acuerdo con las normas de la sección 2 de este manual.

Para su seguridad, nunca abra el controlador cuando este se encuentre encendido. Es peligroso para usted y para algunos componentes delicados, ya que podrían recibir una descarga eléctrica.

Cuidado, proteja el equipo de la humedad y del calor excesivo, así como de cualquier otro equipo que produzca potentes campos eléctricos.

Si el controlador se encuentra aparentemente correctamente bien instalado, el encontrar la causa de los defectos requiere un proceso sistemático. Algunas posibles razones pueden ser:

Efecto: inmediatamente después de encendido el controlador, no prende la luz de la pantalla y no enciende el ventilador.

Causa: No hay corriente de alimentación al controlador.

Procedimiento: revise que el controlador este correctamente conectado a la fuente de alimentación (110VAC), y verifique que el interruptor del panel frontal este en posición de encendido.

Efecto: la luz de la pantalla LCD enciende, pero muestra mensajes incompletos o no muestra nada.

Causa 1: las termocuplas están siendo presionadas por el soporte que sostiene el controlador.

Procedimiento1: asegúrese de instalar el controlador como se indica en la sección 2.1 de este manual y presione el botón de reset.

Causa 2: El controlador se encuentra cercano a otro equipo que produce un campo magnético potente.

Procedimiento 2: en este caso lo mejor es alejar el controlador del equipo que produce el campo magnético y presionar el botón de reset.

Efecto: cualquiera de los LEDs del panel frontal esta encendido.

Causa: la termocupla a la cual pertenece el LED esta desconectada o rota.

Procedimiento: referirse a la sección 2.4 de este manual.

Efecto: hay variación de la temperatura en la superficie de medición, pero la termocupla no esta registrando el cambio.

Causa: La punta de la termocupla no quedo haciendo contacto con la superficie.

Procedimiento: asegúrese de atornillar la termocupla de tal manera que la punta quede haciendo contacto con la superficie de medición.

Efecto: la temperatura esta subiendo, pero la pantalla LCD indica que la temperatura actual esta decreciendo, ó al contrario, la temperatura disminuye pero el controlador indica que la temperatura actual aumenta.

Causa: La termocupla quedo conectada con la polaridad invertida.

Procedimiento: al momento de conectar una termocupla al controlador, verifique que la polaridad sea la que indica el conector para termocupla.

Ver sección 2.4 de este manual.

ANEXO 2.

Esta rutina convierte el valor analógico que ingresa por los canales 0,1 y 2 del pic16f877 en su correspondiente valor digital.

```
VAL_REAL
    BCF  ADCON0,CHS0
    BCF  ADCON0,CHS1 ;canal-0
    CALL ADQ          ;Subrutina con un tiempo para multiplexar las señales
    BSF STATUS,RP0   ;que entran en el ADC
    BCF  STATUS,RP1
    MOVF ADRESL,0
    BCF  STATUS,RP0
    MOVWF DIGIL1     ;Variable que almacena el valor digital del canal-0
    MOVF ADRESH,0
    MOVWF DIGIH1
    CALL RETARDO
    BSF  ADCON0,CHS0 ; canal-1
    CALL ADQ
    BSF STATUS,RP0
    BCF  STATUS,RP1
    MOVF ADRESL,0
    BCF  STATUS,RP0
    MOVWF DIGIL2     ;Variable que almacena el valor digital del canal-1
    MOVF ADRESH,0
    MOVWF DIGIH2
    CALL RETARDO
    BCF  ADCON0,CHS0 ; canal-2
    BSF  ADCON0,CHS1
    CALL ADQ
    BSF STATUS,RP0
    BCF  STATUS,RP1
    MOVF ADRESL,0
    BCF STATUS,RP0
    MOVWF DIGIL3     ;Variable que almacena el valor digital del canal-2
    MOVF ADRESH,0
    MOVWF DIGIH3

ADQ  NOP
     NOP
     NOP
     NOP
     BSF  ADCON0,GO
     WAIT_ADC  BTFSC ADCON0,GO
     GOTO WAIT_ADC
     RETURN
```

Esta rutina compara la temperatura de la termocupla, con la temperatura que ingresa por el teclado y envía una señal al TRIAC respectivo.

```
COMPARAR
    MOVF CENTENA1,0           ;TREAL1-TREFERENCIA1
    SUBWF    CEN1,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC1_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC1_OFF
    MOVF DECENA1,0
    SUBWF    DEC1,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC1_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC1_OFF
    MOVF UNIDAD1,0
    SUBWF    UNI1,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC1_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC1_OFF
    GOTO TRIAC1_ON
```

```
COMP2
    MOVF CENTENA2,0           ;TREAL2-TREFERENCIA2
    SUBWF    CEN2,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC2_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC2_OFF
    MOVF DECENA2,0
    SUBWF    DEC2,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC2_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC2_OFF
    MOVF UNIDAD2,0
    SUBWF    UNI2,0
    BTFSS STATUS,C
    GOTO TRIAC2_ON
    BTFSS STATUS,Z
    GOTO TRIAC2_OFF
    GOTO TRIAC2_ON
```

```
COMP3
    MOVF CENTENA3,0           ;TREAL3-TREFERENCIA3
```

```

SUBWF     CEN3,0
BTFSS STATUS,C
GOTO TRIAC3_ON
BTFSS STATUS,Z
GOTO TRIAC3_OFF
MOVF  DECENA3,0
SUBWF     DEC3,0
BTFSS STATUS,C
GOTO TRIAC3_ON
BTFSS STATUS,Z
GOTO TRIAC3_OFF
MOVF  UNIDAD3,0
SUBWF     UNI3,0
BTFSS STATUS,C
GOTO TRIAC3_ON
BTFSS STATUS,Z
GOTO TRIAC3_OFF
GOTO TRIAC3_ON

```

```

TRIAC1_ON BSF  PORTC,0 ; Enciende el Triac1
          GOTO COMP2
TRIAC1_OFF BCF  PORTC,0 ; Apaga el Triac1
          GOTO COMP2

```

```

TRIAC2_ON BSF  PORTC,1 ; Enciende el Triac2
          GOTO COMP3
TRIAC2_OFF BCF  PORTC,1 ; Apaga el Triac2
          GOTO COMP3

```

```

TRIAC3_ON BSF  PORTC,2 ; Enciende el Triac3
          GOTO VAL_REAL
TRIAC3_OFF BCF  PORTC,2 ; Apaga el Triac3

```

ANEXO 3.

En este apartado se presentan una serie de rutinas escritas en el ensamblador MPASM de MICROCHIP con objeto de proporcionar al usuario una idea de cómo gestionar las diferentes actividades a realizar con el módulo LCD. Están realizadas basándose en un PIC 16f877.

INI_LCD

; Realiza la inicialización del módulo LCD según los tiempos marcados por el fabricante (15 ms). En este ejemplo se inicia con una interfase de 8 bits de bus de datos, 2 líneas de visualización y caracteres de 5 x 7 puntos.

```
MOVLW    B'00111000'  
CALL    CONTROL    ; Código de instrucción  
MOVLW    B'00000110'  
CALL    CONTROL  
MOVLW    B'00001100'  
CALL    CONTROL  
RETURN
```

CONTROL

; Pone al LCD en modo de recibir comandos, espera que el LCD ejecute la última operación y genera el pulso de activación en la señal E.

```
BCF    PORTE,RS  
MOVWF    PORTD  
CALL    LCD_YA  
CALL    LCD_E  
RETURN
```

DATO

; Pone el LCD en modo datos y manda el byte presente en W que será mostrado en pantalla.

```
BCF    PORTE,RS  
MOVWF    PORTD  
CALL    LCD_YA  
BSF    PORTE,RS  
CALL    LCD_E  
RETURN
```

LCD_E

Genera un pulso de 1 μ S por la patita 6 (Enable) del LCD.

```
BSF  PORTE,E
NOP
BCF  PORTE,E
RETURN
```

LCD_YA

Chequea si el LCD esta ocupado y retorna de la rutina cuando ya no lo este.

```
BSF  PORTE,RW
BSF  STATUS,RP0
MOVLW  OFF
MOVWF  TRISD
BCF  STATUS,RP0
BSF  PORTE,E
NOP
WAIT2
BTFSC PORTD,7
GOTO  WAIT2
BCF  PORTE,E
BSF  STATUS,RP0
CLRF  TRISD
BCF  STATUS,RP0
BCF  PORTE,RW
RETURN
```

ANEXO 4.

Manejo del teclado: para saber que tecla esta siendo pulsada necesitamos escanear el teclado, y esto se consigue mediante la siguiente rutina que consiste en ir ubicando una a una las líneas RB1 a RB3 (conectadas a las columnas del teclado) a nivel bajo ya que estas salidas tienen conectada la resistencia de polarización a Vcc y por lo tanto están siempre a nivel lógico alto. Cada vez que una columna se pone a nivel bajo se hacen 4 comprobaciones para ver si una de las cuatro filas se a puesto a nivel bajo y así saber la tecla pulsada.

WAIT_CIF

; Esta rutina recibe una cifra y en caso de que la cifra que se oprimió fue el # o * sigue esperando una cifra numérica.

```
CALL WAIT_TECLA
MOVWF     CIFRA
XORLW    '*'
BTFSC STATUS,Z
GOTO WAIT_CIF
MOVF CIFRA,0
XORLW    '#'
BTFSC STATUS,Z
GOTO WAIT_CIF
RETURN
```

WAIT_TECLA

```
CLRF TECLA
MOVLW B'1101'
MOVWF PORTB
```

; ESCOGE UNA COLUMNA

REV_COL

```
BTFSS PORTB,4           ; REVISA FILAS
GOTO ANTI_REV
INCF TECLA,1
BTFSS PORTB,5
GOTO ANTI_REV
INCF TECLA,1
BTFSS PORTB,6
GOTO ANTI_REV
INCF TECLA,1
BTFSS PORTB,7
GOTO ANTI_REV
INCF TECLA,1
```

```

MOVLW    0C
XORWF    TECLA,0
BTFSC STATUS,Z
GOTO WAIT_TECLA
BSF     STATUS,C
RLF     PORTB,1
GOTO REV_COL

```

ANTI_REV

; Espera a que la tecla sea soltada para evitar rebotes, y reactivaciones de tecla.

```

CALL DELAY
MOVLW    0F
MOVWF    PORTB

```

TABLA

; Tabla de conversión. Retorna con el valor en hexadecimal y lo pone en la variable Cifra. Vuelve al programa principal que hizo la llamada.

```

MOVF TECLA,0
ADDWF PCL,1
RETLW '1'
RETLW '4'
RETLW '7'
RETLW '*'
RETLW '2'
RETLW '5'
RETLW '8'
RETLW '0'
RETLW '3'
RETLW '6'
RETLW '9'
RETLW '#'

```

DELAY

```

BSF T1CON,TMR1ON
WAIT_05
BTFSS PIR1,TMR1IF
GOTO WAIT_05
BCF T1CON,TMR1ON
BCF PIR1,TMR1IF
RETURN

```